Эскизный проект

создания уникальной инфраструктуры для фундаментальных и прикладных исследований

в Новосибирском научном центре

Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»)

Новосибирск, 2018

Содержание:

1. Краткое описание проекта 5
2. Объекты пользовательской инфраструктуры ЦКП «СКИФ» 7
   2.1. Экспериментальные станции 1-й очереди 10
      2.1.1. Станция «Микрофокус» 11
      2.1.2. Станция «Структурная диагностика» 25
      2.1.3. Станция исследования быстропротекающих процессов 54
      2.1.4. Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» 63
      2.1.5. Станция «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» 83
      2.1.6. Станция «Электронная структура» 94
   2.2. Экспериментальные станции 2-й очереди 121
   2.3. Устройства генерации излучения 124
   2.4. Фронтэнды экспериментальных станций 131
   2.5. Лабораторный корпус 137
   2.6. Вычислительный центр 139
3. Накопитель электронов 141
   3.1. Магнитная структура 141
   3.2. Магнитная система синхротрона 156
   3.3. Источники питания 166
   3.4. Вакуумная система 175
   3.5. Высокочастотная система основного кольца 185
   3.6. Диагностическая система 199
   3.7. Система управления комплекса СИ 220
4. Инжекционный комплекс 231
   4. 1. Структура и основные параметры 231
   4.2. Линейный ускоритель 232
   4.3. Бустерный синхротрон 242
   4.4. Система впуска-выпуска бустерного синхротрона 254
   4.5. Каналы транспортировки 273
5. Инженерно-строительная инфраструктура ЦКП «СКИФ» 275
   5.1. Инфраструктура зданий ЦКП «СКИФ» 278

5.2. Инженерные системы ЦКП «СКИФ» 292
5.3. Персонал ЦКП «СКИФ» 298
6. Принципиальный план-график реализации проекта 301
7. Стоимость проекта, требуемая вспомогательная инфраструктура 309
7.1. Инженерно-строительная инфраструктура 316
7.2. Ускорительный комплекс 317
7.3. Экспериментальные станции первой очереди 318
7.4. Лабораторный корпус 324

В подготовке Пояснительной записки к проекту принимали участие сотрудники ИЯФ СО РАН, ИК СО РАН, ИГМ СО РАН, ИНХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИХБФМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИЦИГ СО РАН и других научно-исследовательских организаций СО РАН, НГУ и НГТУ.

Работа ведётся на основании:

1. Указа Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" (п. 21, п. 30 г, п.32, п. 39 б, п. 45).

2. Поручения Президента Российской Федерации В.В. Путина от 18 апреля 2018 года п. 1б. и п.4.

3. Указа Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года".

1. Краткое описание проекта

Цель проекта: Реализация пилотного проекта ЦКП «СКИФ» с целью создания современной отечественной сетевой инфраструктуры на базе источников синхротронного излучения нового поколения с головной машиной в НИЦ «Курчатовский институт».

Актуальность: Реализация проекта позволит на десятилетия обеспечить Сибирский регион высокопроизводительной современной инфраструктурой для решения актуальных задач материаловедения (включая технологии двойного назначения), биологии и медицины, создать условия для проведения исследований и разработок, соответствующие современным принципам организации научной и инновационной деятельности. Центр позволит сконцентрировать, закрепить и развить региональные интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы для обеспечения выхода российских научных, образовательных организаций и производственных компаний на глобальные рынки знаний и технологий.

Планируемая кооперация: В настоящее время СО РАН в лице Президиума, Объединённых учёных советов СО РАН и более 25 организаций, включая организации реального сектора экономики, уже поддержали инициативу ИЯФ СО РАН и ИК СО РАН о реализации проекта. Ведутся переговоры с РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ о совместном развитии технологий производства современных высокочастотных, силовых и магнитных систем. Начато создание кооперации с ВУЗами Новосибирска для развития учебных программ по подготовке молодых специалистов и организации совместных специализированных лабораторий. К настоящему времени уже реализованы пилотные проекты регулярных школ для студентов НГУ, НГТУ и молодых учёных по тематикам развития ускорительной техники и использования синхротронного излучения с целью своевременной подготовки специалистов высокой квалификации, предложена и принята новая магистерская программа. Планируется развитие международной научной кооперации с синхротронными центрами Японии (Spring-8), Китая (BSRF), Таиланда (SPS), Франции (ESRF), Германии (DESY) и другими.

Потребность в инфраструктуре для проведения прикладных исследований с использованием СИ также имеется у ряда региональных и федеральных наукоёмких производств, а также центров инновационного развития (технопарков).

Оценка количества участников на этапе выхода на полную мощность: более 250, из них 200 – научно-исследовательские организации, 10 – ВУЗы, более 30 – промышленные предприятия и организации реального сектора экономики, 10 – иностранные организации.

Планы развития инфраструктуры: Планируется строительство здания синхротрона и экспериментального зала, окружающего синхротрон, с наружным диаметром около 220 метров. Также планируется создание лабораторного корпуса, с помещениями для размещения пользователей и персонала, помещениями для пробоподготовки, предварительных и сопутствующих исследований. Общая установочная мощность оборудования - 20 МВт.

Кадровый потенциал проекта: При реализации проекта будет создано 300 новых рабочих мест для высококвалифицированных сотрудников (научный, инженерно-технический персонал) и дополнительно в экспериментальных работах будет задействовано около 100 научных сотрудников ежедневно и до 10 000 ежегодно.

Необходимое финансирование: Для сооружения проекта класса мегасайенс в полном объеме необходимо финансирование со стороны Российской Федерации в следующих размерах: 2019 г. – 1 000 млн руб.; 2020 г. - 3 400 млн руб.; 2021 г. – 10 500 млн руб.; 2022 г. – 12 600 млн руб.; 2023 г. – 9 300 млн руб.; 2024 г. – 2 700 млн руб.

Сроки реализации 1-ой очереди проекта 2019-2024 годы. За этот период инвестиции в проект оценочно составляют около 40 млрд. рублей. Введение в эксплуатацию ЦКП «СКИФ» планируется до конца 2024 года. С 2024 года планируется реализация 2-ой очереди ЦКП «СКИФ» (создание и развитие экспериментальных станций) в течение 10 лет (2024 – 2033 годы) и общей стоимостью 27 млрд. рублей.

Возможные риски: Имеющийся в ИЯФ, ИК и других организациях СО РАН, а также в НИЦ «Курчатовский институт» опыт создания источников синхротронного излучения и экспериментальных станций, опыт эксплуатации и решения научных и научно-технических задач позволяет с уверенностью говорить о том, что проект будет реализован в срок при обеспечении необходимого поэтапного финансирования.

Результаты реализации проекта: Создание и использование современной научно-исследовательской инфраструктуры позволит совершить качественный скачок по следующим направлениям:

- ***технологический эффект*** – Создание и развитие отечественных технологий в области силовой электроники, высокочастотных систем, систем автоматизации и контроля, систем высокоточного позиционирования, сверхпроводящих систем и многих других. Новые технологии могут быть применены в авиа-, судо- и машиностроении, на предприятиях добывающей и перерабатывающей, микроэлектронной и химической промышленности, энергетике и ВПК.

- ***социальный эффект*** – Формирование конкурентной инфраструктуры и среды, соответствующей современным стандартам научных исследований, создание новых рабочих мест, укомплектованных молодыми кадрами, и связанное с этим развитие социальной инфраструктуры региона.

- ***экономический эффект*** – Развитие транспортной, энергетической и технологической инфраструктуры Сибирского региона. Внедрение новых и импортозамещающих эффективных технологий. Трансфер передовых технологий отечественным субподрядным организациям.

- ***научный эффект*** – Получение новых фундаментальных знаний о строении и свойствах вещества на микро- и наноуровне для решения задач биологии и медицины, химии и катализа, энергетики будущего и других областей.

- ***стратегический эффект*** – Новый исследовательский центр позволит сконцентрировать, закрепить и развить интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы в Сибирском и Дальневосточном регионах, обеспечить устойчивость позиций российских научных, образовательных организаций и производственных компаний на глобальном рынке знаний и технологий.

2. Объекты пользовательской инфраструктуры ЦКП «СКИФ»

Целью научно-технологического развития Российской Федерации (в соответствии со Стратегией научно-технологического развития РФ, утверждённой указом Президента РФ от 01.12.2016 за №642) является обеспечение независимости и конкурентоспособности страны за счет создания эффективной системы наращивания и наиболее полного использования интеллектуального потенциала нации. В соответствии со Стратегией и с Указом Президента РФ от 07.05.2018 за №204 одним из механизмов достижения поставленной цели является создание передовой инфраструктуры научных исследований для развития новых технологий и инновационной деятельности, включая создание и развитие сети уникальных научных установок класса «мегасайенс», крупных исследовательских инфраструктур на территории Российской Федерации.

В ближайшей и долгосрочной перспективе отечественная сетевая инфраструктура Центров коллективного пользования на базе источников синхротронного излучения будет наиболее адекватным и мощным инструментом реализации Стратегии. Во всём мире источники СИ принципиально по своей сути - объекты мультидисциплинарной исследовательской инфраструктуры, обеспечивающие проведение научных исследований в различных областях науки и техники от материаловедения до медицины. Поэтому на их базе создаются передовые научные центры мирового уровня, которые также позволят сформировать целостную систему подготовки и профессионального роста научных кадров, обеспечив условия для осуществления молодыми учёными научных исследований и разработок, создания конкурентноспособных коллективов. Следует отметить, что срок эффективной работы ЦКП составляет 25-30 лет, поэтому создание таких центров позволит Российской Федерации не только войти, но и обеспечить долговременное присутствие в числе пяти ведущих стран мира, осуществляющих научные исследования и разработки в областях, определяемых приоритетами научно-технологического развития (п. 10 Указа Президента РФ от 07.05.2018 за №204). Введение в строй источников СИ позволяет Российской Федерации и локомотивам отечественной промышленности быть в авангарде научно-технического прогресса, обеспечить опережающее развитие в таких областях, как здравоохранение, образование, экология, культура, и завоевать лидерство в международной кооперации.

Приборы и методы экспериментальной физики, развиваемые на исследовательских станциях источников СИ позволят добиться существенного продвижения в реализации ключевых технологий Российской Федерации, в том числе:

- Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.

- Технологии создания новых лекарственных препаратов (необходимый этап работ – рентгеноструктурный анализ взаимодействия лекарственных комплексов с белками).

- Технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения.

- Технологий создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

- Технологий создания и использования новых функциональных и конструкционных материалов и покрытий, в том числе наноматериалов и композитов.

- Технологий аддитивного производства и методов, обеспечивающих переход на следующий технологический уклад.

- Технологий поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

- Военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.

- Генетические, робототехнические, информационные, когнитивные технологии и многие другие.

Важной особенностью исследовательской инфраструктуры на базе источников СИ является возможность своевременного обновления экспериментальных станций и методов. Центр коллективного пользования в данном случае выступает как высокоадаптивный инструмент, который может быть относительно легко переконфигурирован или модернизирован для решения новых фундаментальных и прикладных научных задач. Именно поэтому возможности ЦКП «СКИФ» принципиально не ограничены актуальными задачами, пример которых приведён в данной главе. Необходимо понимать, что с расширением круга фундаментальных проблем материаловедения, химии, медицины, биологии, геологии, катализа и других областей наук инструментарий ЦКП «СКИФ» сможет оставаться адекватным поставленным задачам.

В работах на этапе эскизного проектирования пользовательской инфраструктуры приняли участие сотрудники ИЯФ СО РАН, ИК СО РАН, ИГМ СО РАН, ИНХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИХБФМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИЦИГ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН и других научно-исследовательских организаций, НГУ и НГТУ. Необходимо также отметить ключевую роль НИЦ «Курчатовский институт» в

совместных работах по подготовке определяющих решений по созданию ускорителя и комплементарных экспериментальных станций.

2.1. Экспериментальные станции 1-й очереди

На основании анализа потребностей пользователей синхротронного излучения в Сибирском регионе был предложен и утверждён на заседании Научно-координационного совета ЦКП «СКИФ» (Протокол №1 от 11.05.2018) список из шести экспериментальных станций первой очереди. Этот список обусловлен наличием целого ряда актуальных задач в различных областях физики, химии, биологии, геологии и катализа. В первую очередь включены следующие станции:

1. Станция «Микрофокус»;
2. Станция «Структурная диагностика»;
3. Станция исследования быстропротекающих процессов;
4. Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»;
5. Станция «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»;
6. Станция «Электронная структура».

Станции первой очереди будут созданы с учетом возможности перестройки инструментов формирования пучков фотонов и систем детектирования для эффективного сочетания различных экспериментальных методик.

2.1.1. Станция «Микрофокус»

Станция «Микрофокус» использует сочетание уникального преимущества источника СИ 4-го поколения — сверхмалого эмиттанса — и последних достижений рентгеновской оптики для решения приоритетных задач фундаментальной и прикладной науки, требующих применения высокоинтенсивных сфокусированных пучков СИ.

Блок задач 1. Расшифровка структур биополимеров (ИХБФМ СО РАН, ИМКБ СО РАН, НГУ)

Биополимеры (нуклеиновые кислоты, белки и т. п.) составляют основу феномена жизни и на молекулярном уровне определяют механизмы функционирования живых организмов и вирусов и передачи наследственной информации. Расшифровка структур биополимеров (прежде всего белков) лежит в основе современного подхода к пониманию причин возникновения заболеваний и направленного дизайна лекарственных препаратов. Фундаментальная значимость этого направления многократно подчёркивалась Нобелевскими премиями, многие из которых, в том числе, в последнее десятилетие, были вручены за исследование биополимеров с использованием СИ.

Необходимость использования СИ для расшифровки структур белков продиктована специфическим набором энергий подходящего для этого излучения, а также необходимостью минимизировать время сбора данных, поскольку сами объекты исследования являются сравнительно короткоживущими.

Задача 1.1. Исследование белков, участвующих в репарации ДНК

Репарация повреждений в ДНК, возникающих под действием экзогенных и эндогенных факторов, определяет генетическую стабильность живого организма. Неисправности в работе систем репарации ДНК связаны с тяжелыми наследственными заболеваниями человека, а также с возникновением онкологических заболеваний и старением. Для решения фундаментальных задач необходимы структурные исследования сложных ансамблей белков различного состава. Возможности станции «Микрофокус» планируется задействовать для изучения структур важнейших участников системы репарации человека: белков XRCC1, RPA, APE1 и их комплексов с нуклеиновыми кислотами, лигандами, ингибиторами.

Задача 1.2. Исследование белков, используемых при редактировании генома

Развитие и использование в перспективе в терапевтическом применении систем геномного редактирования (CRISPR/Cas9) требует знания о структурных особенностях

работы таких систем. Создание новых (с улучшенной эффективностью) систем геномного редактирования требует наличия знания о структуре таких комплексов. Возможности станции «Микрофокус» планируется задействовать для изучения структур важнейших белковых комплексов систем геномного редактирования: CRISPR/Cas9, и систем на базе химерных нуклеаз TALENs.

Задача 1.3. Исследование комплексов ингибиторов систем репарации

Важнейшим направлением является поиск ингибиторов систем репарации для создания на их основе терапевтических препаратов. В настоящий момент в ИХБФМ СО РАН выбран ряд классов соединений для ингибирования ферментов репарации ДНК, ключевых мишеней, ответственных за эффективность радио- и химиотерапии, таких как поли(ADP-рибоза)полимераза 1 (PARP1) и тирозил-ДНК-фосфодиэстераза 1 (Tdp1). Необходимым этапом для дальнейшего улучшения свойств прототипов инновационных отечественных препаратов является анализ структуры их комплексов с белками-мишенями, который планируется осуществить на базе станции «Микрофокус» ЦКП «СКИФ».

Блок задач 2. Создание новых материалов (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИПХЭТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИТФ СО РАН, ИФП СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, НГУ)

Новые функциональные материалы лежат в основе большинства технологических прорывов современности; на создание таких материалов также ориентированы многие вызовы, стоящие сегодня перед наукой. Одним из основных звеньев в процессе разработки материалов с новыми свойствами является детальный анализ их состава и структуры (в т.ч. на микро- и наноуровне, а также на уровне кристаллической структуры) с необходимым пространственным разрешением. Использование сфокусированных пучков СИ позволяет решать эту задачу методами, недоступными для лабораторных приборов, в частности:

- Многоэлементным рентгенфлуоресцентным анализом с перестраиваемой энергией возбуждения
- Рентгеновской дифракцией с субмикронным пространственным разрешением
- Спектроскопией рентгеновского поглощения (EXAFS, XANES)
- Спектроскопией ядерного гамма-резонанса с субмикронным пространственным разрешением с магнитным полем до 17Т и температурой от 5К до 300К

Высокая интенсивность и возможность фокусировка используемого СИ при этом позволяют обеспечивать высокую производительность анализа, в том числе в режиме картирования.

Ниже приводятся примеры возможных задач, для решения которых необходимо синхротронное излучение.

Задача 2.1. Создание высокопрочных материалов авиационного назначения с помощью лазерных и аддитивных технологий

Высокоэнергетические лазерные технологии являются одним из самых современных и перспективных методов получения материалов и покрытий с заданными характеристиками и, что особенно важно, сварных соединений трудносвариваемых материалов, широко применяемых в аэрокосмической технике (сплавы алюминия, титана и т. п.). Для успешного применения таких технологий, однако необходим комплексный контроль структурно-фазового состава конечного изделия, а также остаточных напряжений в нём. Возможности станции «Микрофокус» планируется задействовать для исследования структурно-фазового состава лазерных сварных соединений из высокопрочных алюминиевых сплавов, титановых сплавов, разнородных материалов (сталь-титан, алюминий-титан и др.), а также металлических и металлокерамических покрытий, полученных методом лазерной наплавки на базе аддитивных технологий.

Задача 2.2. Создание новых защитных покрытий методами плазменного и холодного газодинамического напыления

Для успешного использования таких перспективных методов нанесения защитных покрытий как плазменное и холодное газодинамическое напыление (ХГН), необходима возможность систематического комплексного контроля (с высоким пространственным разрешением) границы раздела «покрытие-основа», границ контакта (сваривания) последовательно нанесенных частиц и слоев, анализ субмикропористости, размеров кристаллических зерен многофазных материалов (металлические сплавы, оксидная керамика, металлокерамические композиты) и т. п. Методики, реализуемые на станции «Микрофокус» планируется использовать для определения механизма адгезии при ХГН (в частности на неметаллических подложках), а также пространственного распределения и дисперсности фаз (NiAl, Ni_3Al, Ni_5Al_3 в сплавах на основе Ni-Al, карбидов и боридов в сплавах на основе Co и т. д.) при разработке плазменных технологий нанесения защитных покрытий и анализе их долговечности.

Задача 2.3. Исследование новых полигидридных материалов

Развитие экспериментальных методов, воздействующих на вещество экстремальными давлениями в миллионы атмосфер, продемонстрировало возможность

образования ряда полигидридных материалов — новых соединений химических элементов с водородом. Помимо фундаментального интереса к аномальным свойствам этих соединений (в первую очередь рекордной высокотемпературной сверхпроводимости), очевиден их потенциал как новых материалов для водородной энергетики и высокотемпературных сверхпроводников. Возможности станции «Микрофокус» планируется задействовать для синтеза в экстремальных условиях новых полигидридов, предсказанных с помощью квантовохимических расчётов (в первую очередь соединений с ожидаемой высокотемпературной сверхпроводимостью XH_n с $n \geq 10$ в системах Mg-H, Sr-H, Ba-H, Cs-H, Rb-H, Ta-H и Nb-H), а также исследования их структуры и уникальных свойств.

Задача 2.4. Управление структурообразованием кристаллических фаз, в том числе с использованием переменных температур и давлений

К числу важнейших задач современных химии и материаловедения относятся управление структурой кристаллических фаз и материалов на их основе, а также выявление корреляций «структура – свойства». Исследования структуры в условиях переменных температур и давлений *In Situ* и материалов, в условиях их реальной эксплуатации (*operando*) занимают значительную часть времени во всех современных центрах с источниками синхротронного излучения. Такие исследования важны для разработки широкого спектра функциональных материалов, фармацевтических препаратов, а также для понимания фундаментальных закономерностей формирования кристаллических структур соединений, относящихся к различным классам, в том числе, при неизменном их химическом составе (явление полиморфизма). Скрининг всех возможных кристаллических форм (полиморфных модификаций, сольватов, сокристаллов и солей) является важным условием для международного признания регистрации нового лекарственного вещества, разработки устойчивых технологий производства лекарственных форм на его основе и защиты соответствующих интеллектуальных прав. Фазообразование в условиях высоких давлений и/или переменных температур может быть необратимым из-за кинетических затруднений, что позволяет получать новые вещества и материалы с уникальными свойствами. Наконец, исследования влияния на вещества и материалы изменений температуры, давления и других внешних факторов постоянных и переменных (электрических и магнитных полей, различных газовых и жидких сред, облучения светом и др.) важно для понимания поведения данных веществ и материалов в условиях их реальной эксплуатации, в том числе, в экстремальных условиях. Исследования на монокристаллах необходимым образом дополняют исследования поликристаллических образцов, давая наиболее

достоверную и прецизионную информацию о том, что происходит с кристаллической структурой без нарушения механической сплошности образца, что важно, в частности, для эксплуатации данных монокристаллов в составе различных устройств.

Технические возможности станции «Микрофокус» идеально подходят для проведения всех нерутинных вариантов монокристальных исследований кристаллических веществ и материалов, которые требуют помещения образца в камеры высокого давления, в том числе позволяющие изменять температуру образца от криогенной до нескольких тысяч градусов, проводить исследования монокристаллов в электрических и магнитных полях, помещать их в определенные газовые и жидкие среды, варьировать температуру при нормальном давлении от криогенных до первых сотен градусов Цельсия.

Задача 2.5. Фотокристаллографические исследования

Фотокристаллографические исследования включают изучение структуры веществ и материалов в условиях воздействия излучения в видимой или ультрафиолетовой части спектра. Такие исследования имеют огромное значение не только для фундаментальной науки, но и для разработки различных фотоактивных материалов и устройств, в том числе, нелинейных оптических материалов, фотоактуаторов и фотосенсоров. В последние годы исследования взаимосвязи структуры и оптических свойств, изменений структуры под действием света, а также влияния на фотопревращения варьирования температуры и давления стали одними из наиболее бурно развивающихся в химии, физике и материаловедении. Данные исследования также требуют использования синхротронного излучения, в том числе, с хорошим пространственным (картирование) и временным (исследование динамики процессов) разрешением.

Задача 2.6. Исследования дефектных и напряженных кристаллов

Синхротронное излучение предоставляет уникальные возможности для детального исследования отклонения строения реальных твердых тел от идеального, то есть наличия и пространственного распределения в них дефектов разных типов и поля напряжений, возникновения наноструктурирования в монокристаллических образцах без нарушения их механической сплошности, например, за счет появления и перестройки нанодоменов. Методы диффузного рассеяния требуют возможности регистрации слабых сигналов и минимизации фона, что достигается благодаря использованию синхротронного излучения. Дефекты и напряжения, в значительной степени, определяют физические свойства твердых тел и их реакционную способность. Они могут быть «биографическими», либо возникать в кристалле в результате внешнего

воздействия, структурной перестройки вследствие изменения температуры, давления, освещения, приложения постоянного и переменного электрического или магнитного полей. Для изучения «небиографических» дефектов уникальные возможности исследования монокристаллов в различных экспериментальных условиях *In Situ*, предоставляемые станцией «Микрофокус», будут особенно востребованы.

Задача 2.7. Прецизионные исследования распределения электронной плотности кристаллов (экспериментальная квантовая химия)

Синхротронное излучение предоставляет уникальные возможности для прецизионного изучения распределения электронной плотности в кристаллах, в том числе, в условиях высоких давлений. Эта информация критически важна для понимания природы химических связей и межмолекулярных взаимодействий в кристаллах и их корреляций с физическими свойствами и химической реакционной способностью. Как один из сложных вариантов эксперимента возможно исследование распределения электронной плотности в момент действия света, постоянного электрического или магнитного полей, что важно для дизайна новых материалов и оптимизации их функционирования в составе различных устройств.

Блок задач 3. Исследование геоматериалов (ИГМ СО РАН)

Исследование состава и структуры геологических образцов необходимо для решения широкого круга задач — от оценки экологической обстановки до повышения эффективности разработки полезных ископаемых. В этом случае СИ также обладает рядом преимуществ, недоступных лабораторному оборудованию: возможностью одновременно анализировать содержание нескольких химических элементов с большим разбросом концентраций (от ppm до десятков масс. %) в точке субмикронных размеров, определять локальное окружение и валентное состояние элемента методами спектроскопии рентгеновского поглощения и гамма-резонанса, с высоким пространственным разрешением картировать фазы — носители интересующих элементов.

Задача 3.1. Изучение трудноизвлекаемых форм полезных ископаемых

Актуальной проблемой добычи полезных ископаемых в XXI веке является повсеместное истощение богатых месторождений и необходимость извлечения полезных компонентов из руд, тяжёлых как в плане добычи, так и переработки. Данная необходимость ужесточает требования к технологическому процессу, который должен быть максимально эффективным, избирательным и адаптированным к конкретному сырью; создание таких технологических процессов невозможно без знания формы

нахождения полезного компонента в руде. Наиболее известным примером является так называемое «невидимое» золото, находящееся либо в тонкодисперсной (в том числе наноразмерной) форме, либо химически связанное в сопутствующих минералах. Такое золото не извлекается обычными методами обогащения и переработки даже при высоком валовом содержании в руде и требует применения альтернативных методов. Выявлять подобные формы нахождения полезного компонента планируется с использованием возможностей станции «Микрофокус».

Задача 3.2. Анализ вариаций состава геоматериалов для задач экологии и климатологии

Исследование осадков континентальных озёр, миллиметр за миллиметром непрерывно накапливающихся на протяжении последних тысяч лет позволяет не только отслеживать такие события как падения небесных тел или испытания ядерного оружия, но и независимо (в т.ч. политически) реконструировать климатические изменения последних веков и десятилетий. Незаменимым инструментом таких исследований является многоэлементное профилирование и картирование высокого разрешения с использованием сфокусированных пучков СИ, которое будет реализовано на станции «Микрофокус».

Задача 3.3. Изучение геоматериалов под воздействием экстремальных условий

Поскольку бóльшая часть вещества Земли постоянно находится под воздействием высоких давлений и температур недр нашей планеты, очевидно, что именно поведение геоматериалов в таких (экстремальных) условиях определяет механизмы движения литосферных плит, возникновения землетрясений, извержения вулканов, а также формирования месторождений стратегических полезных ископаемых (алмазов, платиноидов и т. п.). Ключом к пониманию всех этих процессов и их последствий для человечества является экспериментальное изучение поведения минерального вещества, расплавов и флюидов в условиях недр Земли — т. е. при высоких давлениях и температурах. Данное направление планируется реализовать, используя возможности станции «Микрофокус».

Исследования фазообразования в условиях высоких давлений и температур *In Situ* позволяют также найти оптимальные условия для синтеза искусственных минералов, что после масштабирования позволяет производить данные минералы в промышленных масштабах.

Задача 3.4. Исследование включений в минералах

Возможность фокусировки синхротронного излучения в малом объеме позволяет решать ещё одну крайне актуальную задачу исследования геоматериалов, а именно – исследовать фазовый состав и прецизионно определять параметры элементарной ячейки и координаты атомов включений в природных минералах. Эти исследования позволяют установить генезис минерала и восстановить условия, в которых он образовался. Данная задача важна для понимания минералообразования и восстановления картины эволюции недр Земли.

Таблица 2.1.1.1. Распределение задач по секциям станции «Микрофокус»

		Секция «Макро-молекулярная кристаллография»	Секция «Элементный анализ и экстремальные условия»	Секция «Гамма-резонанс»
Блок 1 «Расшифровка структур биополимеров»	***Задача 1.1***	■		
	Задача 1.2	■		
	Задача 1.3	■		
Блок 2 «Создание новых материалов»	***Задача 2.1***		■	■
	Задача 2.2		■	■
	Задача 2.3		■	■
	Задача 2.4	■	■	
	Задача 2.5	■	■	
	Задача 2.6	■	■	
	Задача 2.7	■	■	
Блок 3 «Исследование геоматериалов»	***Задача 3.1***		■	
	Задача 3.2		■	
	Задача 3.3		■	■
	Задача 3.4	■	■	■

Одновременная организация на станции «Микрофокус» нескольких исследовательских секций (рис. 2.1.1.1), использующих различные аналитические методы, требует установки вставного устройства генерации СИ с высокой яркостью и возможностью перестройки энергетического диапазона. Планируется его использование в трёх режимах:

1. Режим «14.4 кэВ» (основной). Излучение 11-й гармоники с энергией 14.40 кэВ, соответствующее гамма-резонансу ядра ^{57}Fe, будет выводится из прямого пучка для использования на секции «Гамма-резонанс», при этом излучение 5-й (6.55 кэВ) и 13-й (17.02 кэВ) гармоник, соответствующее повышенному аномальному рассеянию на

атомах серы и селена, будет выведено на секцию «Макромолекулярная кристаллография», а оставшиеся в прямом пучке гармоники (прежде всего более жёсткие) будут использованы на секции «Элементный анализ и экстремальные условия» пучке (рис. 2.1.1.1).

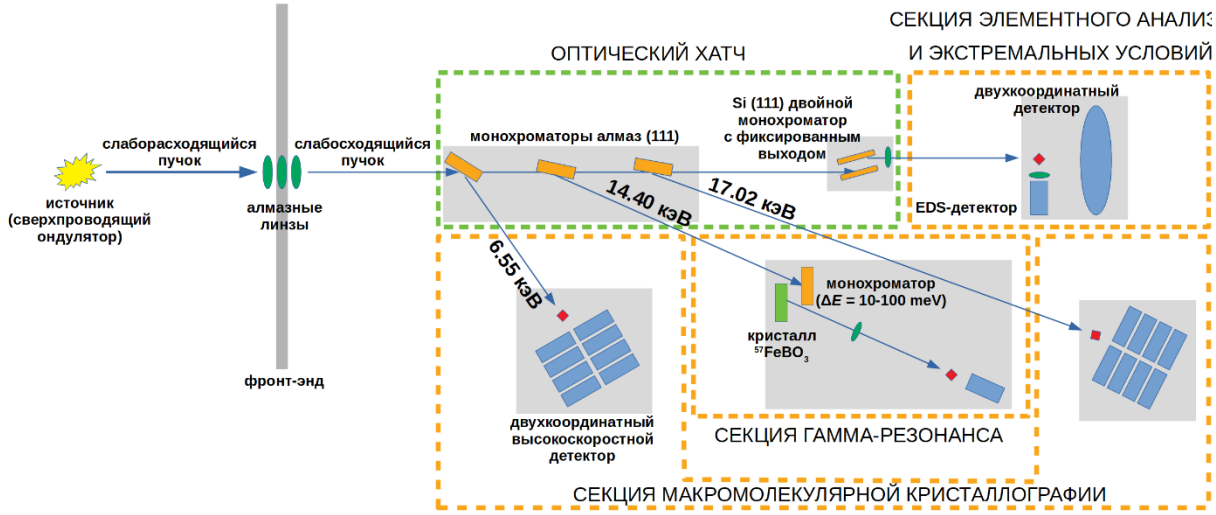

Рисунок 2.1.1.1. Принципиальная оптическая схема станции «Микрофокус».

2. Режим «XAS» с изменением энергии излучения, падающего на образец. В этом режиме для проведения исследований методами спектроскопии рентгеновского поглощения (XANES и EXAFS) на секции «Элементный анализ и экстремальные условия» будет осуществляться сканирование по энергии; секции «Макромолекулярная кристаллография» и «Гамма-резонанс» в данном режиме не задействованы.

Для реализации методов, необходимых для решения поставленных задач, а также наиболее рационального использования излучения, генерируемого вставным устройством, на станции «Микрофокус» планируется организация трёх секций:

1. Секция «Макромолекулярная кристаллография».

Предназначена для исследования важнейших объектов биологии и медицины — белков, структуры которых определяют механизмы функционирования живых организмов, действия лекарственных препаратов и т. п. В соответствии с требованиями методик расшифровки структуры белков, на секции будет предусмотрена работа с двумя энергиями излучения. С первого монохроматора на станцию будет поступать излучение с энергией 6,55 кэВ, соответствующей повышенному аномальному рассеянию на атомах серы (рис. 2.1.1.2). Данное рассеяние будет использоваться для расшифровки структур белков методом S-SAD, не требующим введения в состав белка тяжёлых атомов.

Параллельно на станцию будет поступать излучение с энергией 17,02 кэВ, соответствующей повышенному аномальному рассеянию на атомах селена (рис. 2.1.1.2).

Данное рассеяние будет использоваться для расшифровки структур белков методом Se-SAD, для которого требуется синтез белка с частичным замещением серы на селен. Преимуществом метода по сравнению с S-SAD является в несколько раз более сильное аномальное рассеяние, позволяющее существенно снизить требования к качеству съёмки.

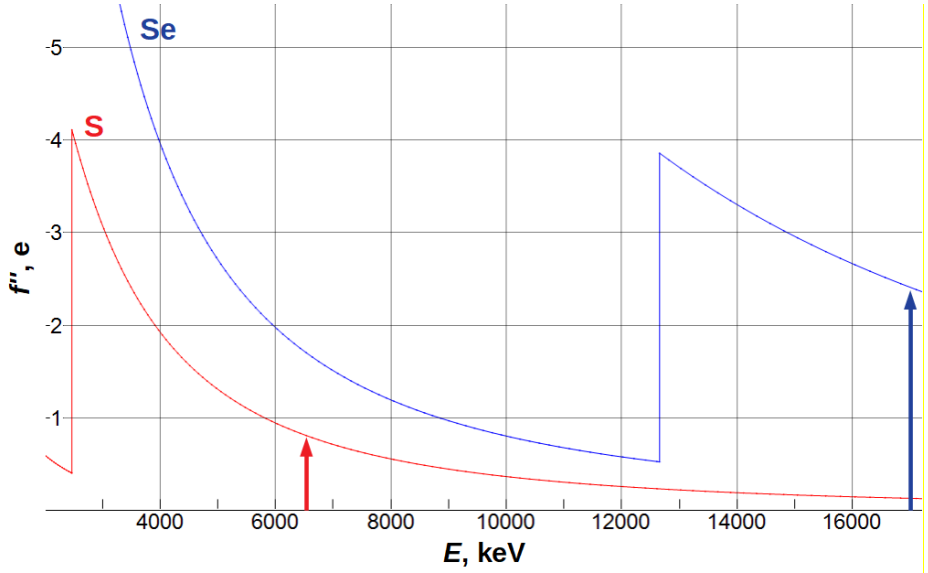

Рисунок 2.1.1.2. Схематическое сравнение кривых поглощения атомов серы и селена.

2. Секция «Элементный анализ и экстремальные условия»

Предназначена для исследования геологических, биологических и функциональных материалов, а также образцов, связанных с культурным наследием и криминалистикой. Реализованные в секции методы позволят одновременно исследовать с высоким пространственным разрешением и возможностью картирования:

- элементный состав образца
- фазовый состав образца
- локальное окружение и валентное состояние выбранных элементов

Ключевым методом канала будет сочетание рентгенфлуоресцентного элементного анализа (в широком диапазоне концентраций) и рентгеновской дифракции с высоким пространственным разрешением, оптимизированное для работы с объектами произвольной формы и размера, характерными для геологических, археологических и т. п. образцов (рис. 2.1.1.3).

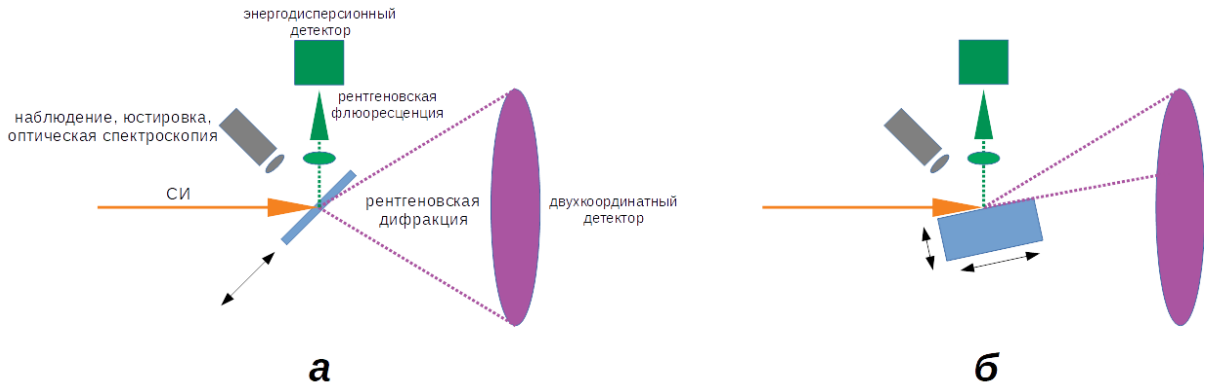

Рисунок 2.1.1.3. Реализация комбинированного картирования элементного и фазового состава для тонких (<0.1 мм) (а) и объёмных (б) образцов (вид сверху).

Возможность изменения энергии возбуждающего излучения в широком диапазоне от 5 до 40 кэВ позволит с максимально высокой чувствительностью анализировать элементы средней части таблицы Менделеева от фосфора (Z = 15) до бария (Z = 56). В эту группу входят породообразующие: P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni; рудные металлы V, Cr, Co, Cu, Zn, Mo; редкие и рассеянные элементы Sc, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs; легкие платиноиды Ru, Rh, Pd и серебро. Одновременная запись спектра рентгеновской флуоресценции и рентгеновской дифракции для каждой точки образца в сочетании с режимом картирования позволят получать детальные карты распределения элементов и кристаллических фаз в образце; в качестве дополняющего метода планируется опция КР-картирования. Возможность изменения угла наклона образца к пучку СИ также позволит регистрировать рентгеновскую дифракцию с монокристаллических частей образца, позволяя решать задачи оценки параметров элементарной ячейки, ориентировки кристаллитов, расшифровки и уточнения кристаллической структуры. Важным дополнением к элементному и фазовому анализу будет опция спектроскопии рентгеновского поглощения (XANES и EXAFS) с высоким пространственным разрешением, которая позволит для выбранного элемента определять не только его концентрацию, но и такие параметры как степень окисления и локальное окружение.

Экстремальные условия будут реализованы при помощи ячейки высокого давления с алмазными наковальнями. На оборудовании секции методами рентгеновской дифракции будет исследоваться поведение широкого класса веществ (минералов, сверхтвёрдых соединений, новых сверхпроводников, материалов для водородной энергетики и т. п.) под воздействием экстремальных давлений (миллионы атмосфер) и температур (тысячи градусов), проявляющих в веществе новые эффекты и свойства, недоступные для наблюдения в нормальных условиях. Сочетание давления до нескольких миллионов атмосфер с широким температурным диапазоном (4 — 6000 К)

позволит изучать структуру кристаллических, аморфных и жидких тел для решения задач геологии, химии, физики и материаловедения. Сочетание двухкоординатного детектора с возможностью сильно анизотропного одноосного сжатия образца также позволит исследовать пластические свойства материалов в экстремальных условиях.

Возможность локального элементного анализа и спектроскопии рентгеновского поглощения в сочетании с экстремальными условиями также открывает много новых возможностей для экспериментов при высоком давлении, в том числе исследования коэффициентов распределения и окислительно-восстановительных равновесий в недрах планет и т.п.

3. Секция «Гамма-резонанс»

Для реализации метода ядерного гамма-резонанса (мёссбауэровской спектроскопии) предполагается вывод из первичного пучка СИ компоненты с энергией 14.4 кэВ, соответствующей гамма-резонансу мёссбауэровского изотопа ^{57}Fe с последующей ультрамонохроматизацией кристаллом — переизлучателем $^{57}FeBO_3$. В ИФ СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск), уже отработана технология выращивания крупных (5x5 мм) монокристаллов $^{57}FeBO_3$ и в настоящее время ведутся переговоры с ESRF по поводу изготовления и поставки таких монокристаллов на станцию мессбауэровской спектроскопии. В ИФ СО РАН могут быть изготовлены монокристаллы необходимого размера и для секции «Гамма-резонанс» ЦКП «СКИФ».

Синхротронно-стимулированная генерация мёссбауэровской линии предоставит в распоряжение пользователей уникальный источник излучения для спектроскопии ядерного гамма-резонанса, на сегодняшний день доступный только на станции ID18 источника СИ ESRF. Такой источник позволит исследовать магнитную структуру функциональных материалов, с высоким пространственным разрешением картировать степени окисления железа в геологических образцах (последнее необходимо, в частности, для задач оценки алмазоносного потенциала месторождений) и т.п. Также на секции будет возможно исследование образцов в экстремальных условиях. Для исследования магнитных материалов будет предусмотрена возможность работы с магнитным полем до 17 Т при температурах от 5 К до 300 К, для решения геофизических задач на Секции будут использоваться камеры высокого давления до 100-150 ГПа.

Принципиальная рентгенооптическая схема станции.

1. Разделение и монохроматизация пучков СИ

Для одновременного функционирования всех секций и эффективного использования спектра вставного устройства разработана система вывода из первичного пучка необходимых гармоник тремя алмазными монохроматорами (111) по Брэггу (рис. 2.1.1.1). При этом высшие гармоники излучения проходят через алмазные монохроматоры с минимальным поглощением и используются на секции «Элементный анализ и экстремальные условия».

Первый алмазный монохроматор выводит 5-ю гармонику (6.55 кэВ) под углом 55° к первичному пучку на секцию «Макромолекулярная кристаллография» для дифракционных исследований с использованием аномального рассеяния на атомах серы.

Следует отметить, что методы макромолекулярной кристаллографии не требовательны к интенсивности пучка (часто, напротив, требуется снизить его интенсивность, чтобы замедлить деградацию образца), что и позволяет в дизайне станции использовать вывод пучка в сторону под большим углом. Результирующий потоки на энергии 6.55 кэВ ожидается не ниже 10^{12} фотон/с (0.1%).

Подавление гармоник высших порядков на станции «Макромолекулярная кристаллография» будет осуществляться за счёт плоских зеркал, либо рефрактивной оптики.

Второй алмазный (111) монохроматор выводит пучок 14.4 кэВ (11-я гармоника) на станцию «Гамма-резонанс» под углом 24°. После него пучок попадает на монохроматор повышенного разрешения, дающий ширину линии 10-100 мэВ, который в свою очередь направляет пучок на мёссбауэровский кристалл-переизлучатель $^{57}FeBO_3$.

За вторым установлен третий алмазный (111) монохроматор, выводящий пучок 17.02 кэВ (13-я гармоника) под углом 20° на станцию «Макромолекулярная кристаллография» для дифракционных исследований с использованием аномального рассеяния на атомах селена.

Более жёсткое рентгеновское излучение проходит через оба алмазных (111) монохроматора практически без поглощения и попадает на двухкристальный кремниевый (111) монохроматор с фиксированным выходом, пучок с которого используется на секции «Элементный анализ и экстремальные условия».

Все монохроматоры планируется охлаждать жидким либо газообразным азотом. Всего на канале будет задействовано 5 монохроматоров.

2. Фокусировка пучков

Первичная фокусировка пучка может осуществляться блоком алмазных линз, установленным непосредственно во фронтэнде. Фокусное расстояние будет подобрано таким образом, чтобы обеспечивать фокусировку мягкой гармоники 6.55 кэВ на образец

ближайшей к фронтэнду секции «Макромолекулярная кристаллография». При этом хроматизм линзы приведёт к уходу фокусов последующих гармоник вдаль за пределы использующих их станций, таким образом превращая первичный пучок СИ из слаборасходящегося в слабосходящийся. Финальная же фокусировка будет осуществляться наборами бериллиевых линз с переменным фокусным расстоянием (трансфокаторами). В качестве дополнительных фокусирующих элементов могут использоваться поликапиллярные линзы.

Всего на канале будет задействовано 5 оптических элементов: алмазные линзы и бериллиевые трансфокаторы (4 комплекта).

3. Контроль пучков

Для контроля пучков планируется использовать позиционно-чувствительные ионизационные камеры (до и после каждого оптического элемента), а также рентгеночувствительные видеокамеры.

Для решения задач экспериментальной станции «Микрофокус» и обеспечения указанных выше режимов работы в качестве устройства генерации излучения предлагается использовать сверхпроводящий ондулятор типа 2 (см. таблица 2.3.3). В основном режиме работы поле в ондуляторе B = 1.37 Тл, используются 5-я гармоника с энергией 6,55 кэВ, 11-я с энергией 14,40 кэВ, 13-я с энергией 17.02 кэВ, а также более жёсткие гармоники. Для проведения исследований локальной структуры методами XAFS-спектроскопии используется возможность быстрой перестройки поля в катушках ондулятора синхронно с поворотом кристаллов монохроматора.

2.1.2. Станция «Структурная диагностика»

Экспериментальная станция предназначена для решения широкого спектра исследовательских и технологических задач, связанных с использованием методов рентгеновской дифракции. В основе концепции станции лежит реализация комплексного подхода к структурным исследованиям синтетических и природных объектов, на основе наиболее полного набора экспериментальных методик, использующих уникальные преимущества современного источника СИ высокой яркости, передовых рентгенооптических решений и новейших систем детектирования, в том числе отечественной разработки. Станция включает в себя секции «Дифрактометрия высокого разрешения», «Монокристальный РСА», «Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах», «Малоугловое рентгеновское рассеяние».

Круг актуальных экспериментальных задач включает исследование фазового состава, локальной и электронной структуры и структурных превращений самых разнообразных веществ и материалов – катализаторов, минералов, функциональных и конструкционных материалов, магнитных материалов, материалов для энергетики и энергосбережения, для строительной индустрии, пигментов, фармацевтических материалов, а также материалов, используемых в технологиях двойного назначения. Реализованные на станции методы позволят проводить эксперименты с высоким угловым и пространственным разрешением, в условиях внешних воздействий *In Situ* и *Operando*, будут реализованы методы рентгеноструктурного анализа монокристаллов для сильно поглощающих и мелких (с характерным размером менее 10 мкм) объектов. Станция будет базой для дифракционных исследований наноразмерных, наноструктурированных и аморфных образцов, биополимеров, стекол и др. на супрамолекулярном уровне.

Блок задач 1. Материалы для водородной энергетики и твердотельных топливных элементов (ИК СО РАН, ИХТТМ СО РАН, МГУ, ТГТУ, НГУ)

Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику, относятся к числу критических технологий Российской Федерации. Поиск новых энергоносителей обусловлен всё возрастающей потребностью в альтернативе углеводородному сырью и ухудшающейся экологической обстановкой. Так, водород рассматривается как наиболее перспективный энергоноситель будущего – при его окислении выделяется больше энергии, чем при сжигании ископаемых энергоносителей и, кроме того, не происходит выбросов продуктов реакции, опасных для окружающей

среды. Генерация электроэнергии при окислении водорода происходит в твердотельных электрохимических устройствах – топливных элементах. Для работы подобного рода устройств необходима сепарация окислителя – кислорода – из окружающей атмосферы с помощью кислород-проводящих мембран. Такие мембраны представляют собой оксидную керамику, обладающую смешанной проводимостью по ионам кислорода и электронам. Наиболее эффективные образцы являются нанокомпозитами переменного состава, данные о структуре которых получают методами дифракции поликристаллов. Перед исследователями стоят несколько основных задач: (1) исследования взаимосвязей между составом и структурой оксидной керамики, (2) исследование транспортных свойств при различных температурах и в различных газовых средах. Эти задачи можно наиболее эффективно решать, используя методы прецизионной дифрактометрии *In Situ* и *Operando*. Высокая интенсивность СИ позволяет проводить исследование сравнительно быстро протекающих структурных превращений в условиях высоких температур и различных газовых средах, возможность варьирования рабочей энергии излучения допускает использование эффекта аномального рассеяния для локализации в структуре некоторых катионов и оценки их зарядовых состояний. Применение комплекса дифракционных методов позволит моделировать процессы, происходящие в топливном элементе и наиболее эффективно проводить поиск наиболее подходящих материалов.

Задача 1.1. In Situ исследования химических и фазовых превращений в сложных оксидных системах с катионами переходных металлов в широком диапазоне температур, давлений и в различных газовых средах

Изучение условий стабильности оксидных систем, предназначенных для создания электродов топливных элементов, газопроницаемых мембран, катализаторов высокотемпературных процессов является необходимым элементом решения соответствующих прикладных материаловедческих задач. Фундаментальные знания, полученные в ходе этих исследований, позволят также уточнять и формировать диаграммы состояний актуальных оксидных систем в шкалах температуры и парциального давления кислорода.

Задача 1.2. Изучение In Situ фазового состава кислородпроницаемых мембран в восстановительной и окислительной атмосферах с использованием эффекта аномального рассеяния

Кислородпроницаемые мембраны являются важнейшими элементами топливных ячеек. Исследования на станции структурной диагностики будут сопровождать отработку методик синтеза новых материалов для кислородпроницаемых мембран, в том

числе, будут изучаться вопросы стабильности материалов в условиях повышенных температур и на границах сред «воздух-вакуум».

Задача 1.3. Исследование электрохимических реакций, в том числе, процессов наводораживания/дейтерирования, а также структурных изменений катодного и анодного материалов литиевых батарей (ИХТТМ СО РАН, ITER, ИЯФ СО РАН, ФТИ им. Иоффе)

Результаты исследований позволят получить данные, необходимые для разработки технологического регламента синтеза и эксплуатации материалов литиевых батарей, водородной энергетики, термоядерного синтеза – материалов первой стенки современных токамаков ITER, DEMO, Глобус-М2, Глобус-3, а также устройств на основе открытых ловушек, типа ГДМЛ.

Блок задач 2. Катализаторы для энергоэффективного катализа, нефтепереработки и экологических приложений (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, НГУ)

До 80 % продукции химической и нефтегазовой промышленности производится с применением катализаторов различного типа. Большая часть промышленных катализаторов относится к гетерогенным катализаторам, которые являются твёрдыми веществами. При этом реагирующие вещества находятся в газовой или жидкой фазе. Исследование структуры важно для понимания природы действия, механизма протекающих реакций и разработке на основе полученных данных целенаправленных стратегий синтеза наиболее активных и эффективных катализаторов. Характерными особенностями гетерогенных катализаторов являются, как правило, малое содержание активного компонента, его высокая дисперсность, многофазность системы и возможное наличие фазы взаимодействия активного компонента и носителя. Следует отметить, что применение методов дифракции с использованием СИ позволяет существенно повысить чувствительность эксперимента, увеличить качество извлекаемой информации.

Синтез гетерогенной каталитической системы включает несколько стадий, в ходе которых формируются соединения-предшественники, претерпевающие в дальнейшем цепь фазовых и структурных превращений. Исследование фазовых превращений и анализ структуры предшественников необходимы для изучения процессов формирования активных катализаторов. Высокая интенсивность СИ позволяет проследить все происходящие процессы в реальном времени в условиях получения, активации и дезактивации катализатора в активных средах. Такие данные необходимы как науке, так и индустрии при разработке методов приготовления, активации и исследовании стабильности катализаторов. Другой отличительной особенностью

твёрдых гетерогенных катализаторов является то, что они работают в условиях химической реакции, при повышенных температурах и в присутствии реакционных газов. Под действием этих факторов структура катализатора может обратимо изменяться. Поэтому для установления природы каталитического действия необходимо проведение структурных исследований непосредственно в условиях каталитической реакции. Кроме того, для выявления механизмов реакции структурные исследования должны сочетаться с одновременным установлением состава газовой фазы, т.е. эксперименты должны проводиться в режиме *Operando*. Проведение подобных экспериментов требует соответствующего экспериментального оборудования, в частности, источника излучения высокой яркости и чувствительной системы детектирования дифракционной картины.

Задача 2.1 Исследование структурных особенностей ультрадисперсных нанесённых катализаторов

Использование СИ для структурной диагностики поликристаллических материалов, к которым относятся и гетерогенные катализаторы позволяет обойти некоторые ограничения метода при решении структурных задач. За счёт высокой интенсивности повышается соотношение сигнал/шум, а за счёт высокой коллимации пучка увеличивается разрешение линий. Помимо подобных общих подходов, для структурной диагностики катализаторов использование СИ позволят решить ряд специфических задач.

Одними из самых широко используемых и исследуемых катализаторов являются катализаторы на основе металлов платиновой группы (Pd, Pt, Rh, Ru, Re и т. д.) и металлов группы IB (Cu, Ag, Au), нанесённых на различные оксидные носители (оксиды алюминия, церия, титана и т. д.). Для максимально эффективного использования дорогостоящих металлов в катализаторе их распределяют по поверхности носителя в виде ультрадисперсных частиц или даже отдельных металлических кластеров. Рутинные лабораторные методы дифракции поликристаллов при исследовании подобных фаз малоэффективны, поскольку на дифракционной кривой превалирует рассеяние от оксидного носителя.

Возможность получить дифракционные данные в большом диапазоне векторов рассеяния позволяет анализировать структурную информацию в виде кривой радиального распределения электронной плотности (РРЭП). Данные РРЭП позволяют напрямую анализировать локальную структуру сильно разупорядоченных фаз. Подобный подход позволяет разделять рассеяние от носителя и нанесённого активного компонента. Анализ ближнего порядка позволяет установить то, как активная фаза

взаимодействует с носителем, наличие дефектов в структуре, особенности морфологии частиц.

Варьирование энергии излучения и использование эффекта аномального рассеяния вблизи края поглощения элемента также позволит наиболее эффективно выделить сигнал от активных металлов на фоне сильного рассеяния от носителя и получать парциальные функции радиального распределения электронной плотности относительно атомов определенного типа. Метод может быть реализован в режимах *In Situ* и *Operando*.

Задача 2.2. Исследование механизмов формирования, активации и дезактивации катализаторов

Специфические особенности спектрально-углового распределения интенсивности излучения современного источника СИ позволяют проводить высокоэффективный анализ процессов формирования активных катализаторов. Возможности современных двумерных детекторов в сочетании с высокой интенсивностью излучения позволяют изучать в реальном времени процессы, протекающие при разложении предшественников катализаторов и при их активации/дезактивации при нагреве их в различных газовых средах. Одним из актуальных направлений является получение биметаллических катализаторов на основе сплавов металлов платиновой группы и переходных металлов. Внедрение второго элемента в активные металлы платиновой группы имеет большой потенциал для управления селективностью катализаторов в целом ряде процессов, например, при необходимости провести селективное гидрирование определённых связей в органических соединениях для задач тонкого органического синтеза. Однако получение подобных систем до сих пор представляет большую сложность. Использование двойных комплексных солей, содержащих в составе одного соединения два и более металла, имеет большой потенциал для решения этой проблемы. Возможности станции «Структурная диагностика» позволят зарегистрировать все структурные превращения в процессе разложения двойных комплексных солей в различных газовых средах. Полученные данные существенно упростят поиск подходящих составов для перспективных биметаллических катализаторов.

Катализаторы и активные системы нередко формируются при расслоении сложных оксидов. (структурные типы перовскита, шпинели, флюорита и другие), как, например, алюмомарганцевые катализаторы процессов полного окисления или каталитически активные состояния, возникающие в восстановительных средах за счет формирования наночастиц оксидов переходных металлов (кобальта, марганца, железа)

на поверхности исходных оксидов со структурой перовскита. Катализаторы для процессов гидрирования, в том числе многие катализаторы для нефтепереработки, формируются при восстановлении оксидного предшественника непосредственно в реакторе. Для того, чтобы установить фазовый состав активной композиции необходимо провести дифракционные измерения в аналогичных условиях. Например, катализаторы синтеза Фишера-Тропша на основе меди, никеля или кобальта подобным образом активируются. Эти элементы легко окисляются при выносе из реактора и контакте с воздухом. С другой стороны, за счёт взаимодействия с носителем, не всегда в условиях активации происходит полное восстановление до металла. Присутствие оксидов оказывает существенное влияние на каталитическую активность и механизм реакции. Исследование процессов активации с высоким временным разрешением в условиях получения активной фазы позволит установить реальный состав активных систем.

При разработке катализаторов для промышленности необходимы данные об устойчивости структуры активной фазы. Нередко в условиях промышленного процесса возникают отклонения температуры и состава газовой среды от оптимальных. При этом важно, чтобы структура активной фазы сохранялась и не деградировала. Использование станции «Структурная диагностика» позволит провести подобные тестирования с высокой скоростью для широкого круга систем. Это позволит для прикладных разработок проводить скрининг и определение рабочих диапазонов ряда критических параметров для широкого круга катализаторов.

***Задача 2.3. Operando* исследования катализаторов в режиме эксплуатации**

Структура катализатора может изменяться не только при формировании активных фаз и при активации, но и непосредственно в режиме каталитической реакции. В условиях каталитической реакции структура может подстраиваться под условия процесса. В определённых условиях могут возникать периодические изменения фазового состава и структуры. Наиболее ярко такие изменения проявляются при возникновении температурного гистерезиса, регулярных и затухающих автоколебаний, химических волн. При этом открываются уникальные возможности исследования одной и той же системы как в высокоактивном, так и в низкоактивном состоянии. Эти процессы могут быть зарегистрированы рентгенографически по изменению фазового состава катализатора, а степень активности катализатора в разных состояниях может быть определена при анализе газовой смеси на выходе из камеры-реактора. Параметры источника СИ 4-го поколения, соответствующие системы детектирования и использование камеры-реактора, допускающей создание над образцом определенного давления реагентов и высоких температур, позволят провести эксперимент с

достаточным разрешением по времени и требуемым уровнем дифракционного сигнала при малом содержании активного компонента.

Блок задач 3. Керамические и высокоэнергетические материалы (ИХТТМ СО РАН, НЭВЗ, ФНПЦ АЛТАЙ, ИПХЭТ СО РАН, РФЯЦ ВНИИТФ, ИХТТ УрО РАН, НГУ)

В данном блоке сконцентрированы задачи, направленные на исследования в интересах оборонного комплекса и космической отрасли.

Задача 3.1. Исследование In Situ фазообразования в процессе синтеза наноразмерных керамических материалов (ИХТТМ СО РАН)

Будут проведены исследования с целью получения необходимых структурных данных, сопровождающих решение задачи синтеза сверхпрочной керамики, а также исследования, выполняемые с целью разработки технологии получения керамических материалов с высокими твердостью и трещиностойкостью, используемых как элементы бронезащиты.

Задача 3.2. Изучение процессов старения высокоэнергетических материалов твердых ракетных топлив и ВВ (ФНПЦ АЛТАЙ, ИПХЭТ СО РАН, РФЯЦ ВНИИТФ)

В процессе длительного хранения эксплуатационные характеристики высокоэнергетических материалов могут меняться – воздействие, даже ограниченное, внешних условий и неконтролируемые процессы в материале могут приводить к его деградации. В этой связи представляется актуальной задача выявления причин деградации высокоэнергетических материалов и поиск путей для их устранения. В ходе работы будут выполнены эксперименты, моделирующие условия старения высокоэнергетических материалов, в результате будет получена информация о происходящих в них структурных превращениях и предложены способы их модификации для повышения их технических характеристик. Будут разработаны рекомендации по улучшению технологии производства и условиям хранения высокоэнергетических материалов.

Задача 3.3. Воздействие ПАВ различной природы (Ca, Ba. V_2O_5) на эффективность окисления дисперсного алюминия во время работы твердотопливного двигателя (ИХТТ УрО АН)

Для повышения эффективности работы твердотопливного ракетного двигателя в ракетное топливо на этапе синтеза вводят модифицирующие добавки, улучшающие эксплуатационные характеристики топлива. Методами рентгеновской дифракции, в том числе, *In Situ*, могут быть выявлены причины повышения эффективности топлива в

зависимости от природы модифицирующих добавок и предложены способы целенаправленной модификации топлива. На станции «Структурная диагностика» комплексом дифракционных методов будут выполняться структурные исследования, сопровождающие разработку компонентов твердого ракетного топлива нового поколения.

Блок задач 4. Пленки (ИСМ РАН, АлТГУ, ИХТТМ СО РАН, ИК РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Тонкие плёнки различного генезиса представляют собой двумерные системы, свойства которых отличаются от трёхмерных массивных объектов того же химического и фазового состава. Исследование структуры тонких плёнок затруднено вследствие малого количества вещества, распределенного по относительно большой площади, поэтому для получения структурной информации совершенно необходима высокая яркость источника излучения. Высокая яркость тем более критична, если задача состоит в диагностике протекающих в плёнках динамических процессов.

Задача 4.1. Исследование динамики процессов фазообразования при СВС в механоактивированных смесях и многослойных плёнках

Для получения тонкоплёночных покрытий на поверхности различных объектов может использоваться метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), когда соединение-предшественник наносится на поверхность объекта при обычных условиях, а затем инициируется процесс СВС, приводящий в результате к формированию тонкой пленки с определёнными свойствами. Для исследования процессов, протекающих при формировании покрытия методом СВС, будет использован источник СИ высокой яркости, современная рентгеновская оптика для фокусировки пучка в исследуемую область и высокоскоростная система детектирования дифракционной картины.

Задача 4.2. Исследование структуры пленок Ленгмюра-Блоджетт

Плёнки Ленгмюра-Блоджетт представляются перспективными для создания микроэлектронных устройств. Поскольку толщина плёнок Л.-Б. составляет несколько монослоёв, для исследования структуры таких плёнок необходима высокая яркость источника излучения в относительно мягкой (20-25 кэВ) спектральной области. Для характеризации плёнок Л.-Б. может быть использован весь комплекс дифракционных методов станции «Структурная диагностика». В результате экспериментов будут получены сведения о структуре плёнок и её изменениях под воздействием внешних условий.

Задача 4.3. Исследование структуры магнитных пленок и многослойных покрытий.

Тонкие пленки магнитных материалов и многослойные структуры ферромагнетик/полупроводник, ферромагнетик/металл, ферромагнетик сверхпроводник перспективны для создания устройств функциональной электроники и спинтроники. Исследования взаимосвязи струткуры и свойств требуют применений комплекса дифракционных методов, методов гамма-резонансной спектроскопии и магнитного кругового дихпроизма.

Блок задач 5. Системы с частично разупорядоченной иерархической структурой: полимерные и углеродные материалы (ИХТТМ СО РАН, ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, компания OCSIAL, Новосибирский технопарк – ГК «Роснано»)

Разработка новых поколений полимерных и углеродных материалов является в настоящее время мировым трендом. Особенности дифракционных исследований этих объектов проистекают из специфики их структуры, сочетающей атомно-упорядоченные элементы с определенным пространственным беспорядком. Синхротронное исследование обеспечивает необходимый уровень точности дифракционных данных, включая данные о диффузном рассеянии рентгеновских лучей, содержащие информацию о характерных особенностях укладки макромолекул.

Задача 5.1. Радиационно-термический синтез сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата с использованием релятивистских электронов современных ускорителей и исследование их структуры дифракционными методами (ИХТТМ СО РАН, РФЯЦ ВНИИТФ, ИК СО РАН)

В результате исследований будут получены экспериментальные данные о структурных особенностях различных модификаций сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата, получаемых обработкой исходного материала в пучке электронов из промышленного ускорителя и обладающих уникальными свойствами. Эксплуатационное поведение новых материалов будет охарактеризовано с использованием экспериментального оборудования различных секций станции «Структурная диагностика».

Задача 5.2. Исследования структуры природных полимеров на основе целлюлозы (ИК СО РАН)

Интерес к биополимерным материалам постоянно растет. Свойства биополимеров, в первую очередь, обусловлены сложной молекулярной структурой: она состоит из нано-волокон, которые образуют разветвлённую сеть, имеющую как

упорядоченные, так и разупорядоченные участки. Сложная структура, нанометровые размеры структурных единиц и их частичное пространственное разупорядочение создают значительные трудности для исследования. Для успешной работы по созданию и применению полимерных материалов на основе целлюлозы необходимы глубокие фундаментальные знания о химии и строении высокомолекулярных соединений, требуются достоверные методики для контроля и оценки качества как исходного сырья, так и конечного продукта. Метод рентгеновской дифракции имеет значительный потенциал для исследования таких систем: он позволяет получать данные о наличии и протяженности кристаллических компонентов, дает информацию об их структурных характеристиках. Узконаправленный параллельный пучок высокой интенсивности, короткая длина волны и высокое разрешение станции «Структурная диагностика», а также возможности использования эффекта аномального рассеяния позволят уточнять атомную структуру и наноструктуру объектов, проводить локальный анализ окружения определенных атомов (меток), оценивать степень однородности и упорядоченности биополимеров.

Задача 5.3. Дифракционные исследования строения углеродных материалов и композитов на их основе в связи с условиями их синтеза и эксплуатации (ИК СО РАН, компания OCSIAL, Новосибирский технопарк – Роснано, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Композиты на основе углеродных материалов имеют уникальные физико-химические свойства и демонстрируют высокий потенциал для различных высокотехнологичных приложений. Сами углеродные материалы представляют собой широчайший класс объектов (нанотрубки, квантовые точки, фуллерены, включая эндоэдральные комплексы фуллеренов и материалы на их основе и др.), которые часто являются дефектными и наноструктурированными системами. Для их практического использования важной задачей является исследование структурных особенностей. Для этих целей одним из наиболее распространенных методов является именно дифракционный анализ, однако стандартное оборудование, обычно, дает неинформативные данные и плохое разрешение. Это связано с тем, что углерод имеет плохую рассеивающую способность рентгеновских лучей, а материалы на его основе часто представляют собой ультрадисперсные системы, обладающие низкой плотностью и большим количеством пор. При этом дифракционные картины часто характеризуются наличием диффузного рассеяния. Поэтому получение качественных рентгенографических данных является первостепенной задачей и требует использования специального оборудования. Синхротронное излучение позволит обеспечить

необходимую точность, даст как локальную, так и интегральную информацию о структуре и агрегации углеродных частиц и позволит получить новые данные.

Блок задач 6. Фармацевтические материалы (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИХКиГ СО РАН, НГУ)

К числу важнейших задач, стоящих перед Российской Федерацией, относится необходимость развития персонализированной медицины, высокотехнологичного здравоохранения и технологий здоровьесбережения, в том числе, за счет создания новых и улучшения известных лекарственных препаратов и обеспечения импортозамещения в области фармации. Современные лекарственные препараты представляют собой сложные многокомпонентные многофазные системы, которые могут рассматриваться как материалы. Для их разработки и оптимизации необходимо, в частности, исследовать изменения в образцах при выдерживании их в контролируемых условиях с определенной влажностью и температурой в специальных климатических камерах, а также детально исследовать процессы фазообразования в условиях переменных температур (от криогенных до температур плавления / разложения образцов, несколько сот градусов Цельсия). Необходимо проводить качественный и количественный анализ образцов, в том числе, выявляя присутствие малых примесей, анализировать размер областей когерентного рассеяния, соотношение содержания кристаллической и аморфной фаз в образце. С учетом важности криотехнологий для получения моно- и полифазных фармацевтических дисперсий, отдельное место будут занимать работы по изучению процессов *In Situ* в ходе замораживания фармацевтических растворов до криогенных температур и их отжига (вакуумной сушки) при пониженном давлении для получения дисперсных частиц, больших пористых композитных частиц и других форм с улучшенными характеристиками, в том числе, для адресной доставки лекарственного вещества к мишени.

Блок задач 7. Монокристаллы (ИНХ СО РАН, ИК СО РАН, НИОХ СО РАН, ИГМ СО РАН, МТЦ СО РАН, НГУ)

Секция монокристальной дифракции ориентирована на определение кристаллической структуры образцов, исследование которых с использованием стандартных лабораторных дифрактометров по определенным причинам (малый размер, малое время жизни и т. д.) крайне затруднено, либо полностью не реализуемо. Необходимость выделения секции для монокристальных исследований на станции «Структурная диагностика» параллельно с созданием станции «Микрофокус»,

обусловлена тем, что на разных станциях используются разные энергии излучения, что позволяет исследовать различные классы объектов, закрывая достаточно полно всю их совокупность именно при эксплуатации обеих станций. На станции «Структурная диагностика» предполагается использовать для монокристальных исследований более жесткое излучение, чем на станции «Микрофокус», что позволит проводить исследования сильно поглощающих объектов, содержащих такие элементы как W, Mo, Pt, Pd, Rh, Ru и другие, а также использовать метод аномального рассеяния рентгеновского излучения для решения ряда специальных задач рентгеноструктурного анализа. Кроме того, специализированная секция на станции «Структурная диагностика», предназначенная для монокристального рентгеноструктурного анализа, призвана принять на себя основной поток образцов для установления кристаллической структуры при нормальных условиях или при охлаждении до температуры жидкого азота, в то время как на станции «Микрофокус» монокристальная дифракция будет применяться, преимущественно, в сочетании с разнообразными внешними воздействиями, для прецизионного исследования электронной плотности, а также исследования превращений в монокристаллах *In Situ* и *Operando*, исследования динамики фотохимических и магнетохимических процессов.

Использование секции монокристальной дифракции позволит решить следующие научные задачи:

Задача 7.1. Рентгеноструктурный анализ монокристаллов. Установление кристаллической структуры и кристаллохимических особенностей новых синтезированных соединений (ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, МТЦ СО РАН, ИК СО РАН, НГУ)

В рамках решения данной задачи будет исследоваться основной поток монокристаллических образцов для установления кристаллической структуры при нормальных условиях или при охлаждении до температуры жидкого азота, в том числе образцов малых размеров (<10 мкм) и образцов, сильно поглощающих рентгеновское излучение. Характерным примером являются металлоорганические каркасные структуры (MOF), кристаллы которых редко имеют размеры более нескольких микрон.

Задача 7.2. Исследование кристаллической структуры и морфологии монокристальных образцов соединений, которые находят или могут найти применения в качестве компонентов функциональных материалов и устройств (ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИК СО РАН, МТЦ СО РАН, НГУ)

В рамках решения данной задачи помимо рутинного определения кристаллической структуры предусмотрено детальное рентгеноструктурное и

кристаллохимическое исследование соединений, обладающих сегнетоэлектрическими, магнитными, нелинейными оптическими, проводящими, свойствами. Эти исследования могут найти применение при разработке оптики, электроники, запоминающих устройств, сенсоров, молекулярных сит и молекулярных контейнеров, средств доставки лекарственных веществ, катализаторов, актуаторов и др. В рамках данной задачи будут также исследоваться такие важнейшие объекты неорганической химии, как сложные оксиды, перовскиты, цеолиты, материалы атомной энергетики, в том числе материалы ТОКАМАК.

Задача 7.3. Исследование динамики процессов с сохранением монокристаллов (ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИК СО РАН, МТЦ СО РАН, НГУ)

В ходе решения этой задачи будет исследоваться динамика процессов, протекающих без утраты кристалличности исследуемого образца, в частности, будут проводиться *In Situ* исследования процессов сорбции-десорбции, необходимые для разработки химических сенсоров, материалов для высокоэффективного разделения веществ (газоселективных мембран). Будет проводиться определение отклонений кристаллической структуры от идеальной на наномасштабах для исследования механизмов ионного транспорта и теплопереноса в кристаллах, необходимое для разработки ионных проводников, термоэлектриков и материалов для нелинейной оптики. Наконец, будет проводиться работа с "нестабильными" (веществами, чувствительными к влажности, кислороду и другим воздействиям "обычной" среды) или легкоплавкими кристаллами, что позволит исследовать кристаллическую структуру материалов, стабильных при критических условиях (например, клатратные гидраты или соединения включения водорода). Будут также исследоваться фото- и магнетохимические превращения.

Блок задач 8. Структурная диагностика ультрадисперсных и наноструктурированных систем (ИК СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИППУ СО РАН, ИТПМ СО РАН, КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, НГУ, НГТУ)

Порошковые высокодисперсные и наноструктурированные системы – важнейший класс материалов разнообразного функционального назначения. Фундаментальный интерес к нанопорошкам определяется их необычным строением и свойствами, отличными от массивных аналогов; прикладной – их практической значимостью: это магнитные материалы, адсорбенты, катализаторы, добавки для модифицирования металлических сплавов, полимеров, защитных покрытий, носители лекарственных препаратов и многое другое. Важнейшими характеристиками,

определяющими физические и химические свойства подобных наноструктурированных систем, являются размеры, форма наночастиц, их взаимная ориентация, способы стыковки, структура граней, выходящих на поверхность, т.е. те параметры, которые определяют наноструктуру объекта. Преимущества использования СИ очевидны, поскольку благодаря высокой интенсивности излучения можно надежно фиксировать размытые (в силу малости размеров кристаллических блоков) профили дифракционных картин, включая эффекты диффузного рассеяния, отвечающие различным проявлениям порядка/беспорядка в организации наноструктуры, «строительными элементами» которой выступают не атомы, а наночастицы.

Задача 8.1. Рентгеноструктурный анализ наноразмерных материалов, в том числе, путем анализа профиля дифракционных картин с использованием функции Дебая (ИК СО РАН, НГУ)

Современные методики рентгеноструктурного анализа нанокристаллов, задачей которого, как и классического РСА, является установление атомной структуры кристаллических областей, базируются на анализе полных дифракционных картин. При этом теоретические расчеты дифракционных картин могут быть выполнены как методом Ритвельда в приближении брэгговского рассеяния, так и по более общему и более информативному алгоритму, использующему функцию Дебая. Последняя методика подразумевает одновременный анализ как когерентного брэгговского, так и диффузного рассеяния, которое крайне затруднительно изучать на лабораторных дифрактометрах с низкой в сравнении с синхротронным излучением интенсивностью пучка. Решение данной задачи очень важно также для исследования различных молекулярных материалов, в том числе, пигментов и фармацевтических материалов, которые, как правило, используются в виде наноразмерных порошков и в которых нередко наблюдается наноструктурирование. Кроме того, для твердых соединений характерно отсутствие как идеальной периодичности, так и полной разупорядоченности, при этом часто реализуются различные переходные состояния, которые могут быть охарактеризованы как модулированные структуры, мезофазы или наноструктурированные образцы и т.д. Исследования структуры с использованием эффекта аномального рассеяния также могут быть весьма полезны при уточнении структуры ультрадисперсных и наноструктурированных материалов (катализаторов, адсорбентов, магнитных материалов, стекол с включением наноразмерных кристаллических частиц и др.).

Задача 8.2. Исследование ближнего порядка в нанокристаллических и аморфных материалах, построение кривых радиального распределения атомов (ИК СО РАН, НГУ, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Дифракционная методика определения ближнего порядка в виде кривых радиального распределения электронной плотности (РРЭП), наряду со спектральным методом EXAFS, является основной методикой изучения атомной структуры аморфных и плохо окристаллизованных (нанокристаллических) объектов. Исследования с использованием очень коротких длин волн (порядка 0.2 Å) позволяют получать кривые РРЭП с высокой точностью в пределах до 10-ти координационных сфер. Новые возможности, появляющиеся в связи с использованием синхротронного излучения источника излучения 4-го поколения, делают эту методику весьма востребованной при решении широкого круга задач – исследовании процессов кристаллизации, изучении структуры наноматериалов и катализаторов, материалов, имеющих пространственно неупорядоченную структуру, в том числе магнитных наноматериалов. Эта же задача стоит при исследовании органических материалов, стекол, а также фармацевтических материалов.

Задача 8.3. Исследование строения когерентных 3D наноструктур на основе анализа диффузного рассеяния рентгеновских лучей (ИК СО РАН, НГУ)

Весьма интересными и перспективными материалами являются системы с когерентным способом стыковки наноразмерных кристаллических блоков. Так, например, сложные оксиды, представляющие собой нанокомпозиты типа перовскит-браунмиллерит, шпинель-NaCl, будут изучаться как перспективные материалы для производства кислородпроницаемых мембран. В настоящее время нарастает интерес, в том числе и в первую очередь со стороны промышленных компаний, к изучению наноструктуры переходных форм оксида алюминия, эффективных носителей для катализаторов и прекурсоров для получения керамических наноструктурированных материалов. Особенности строения когерентных 3D наноструктур можно изучать, анализируя специфические эффекты диффузного рассеяния (слабые максимумы диффузного рассеяния, особенности уширения и смещения брэгговских пиков и т. п.), которые с необходимой точностью могут быть зафиксированы только при использовании синхротронного источника высокой яркости.

Блок задач 9. Структурная диагностика с использование метода малоуглового рассеяния (ИК СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИППУ СО РАН, ИТПМ СО РАН, КНЦ СО РАН, НГУ, ФИЦ КНЦ СО РАН, НГТУ)

Использование низкоэнергетического излучения (5-15 кэВ) предпочтительно при исследованиях различных материалов, в частности, каталитических систем, методами малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР). Метод МУРР заключается в измерении интенсивности излучения, рассеянного в небольшой угловой интервал вблизи направления первичного пучка. В данном случае рассеяние рентгеновского излучения происходит на неоднородностях электронной плотности с характерными размерами от 1 до 1000 нм. Метод не требует наличия дальнего порядка на атомном уровне и может быть применен для исследования аморфных и слабо организованных систем, например, коллоидных растворов.

Задача 9.1. Исследование твердых дисперсных многофазных объектов с помощью методик контрастирования и аномального рассеяния: нанесенные катализаторы, композиты, функциональные материалы, природные материалы, сплавы (керметы) и другие твердые дисперсные системы (ИК СО РАН, НГУ)

Традиционные методы характеризации размеров частиц твердых дисперсных объектов, такие как просвечивающая электронная микроскопия и рентгеновская дифрактометрия, имеют определенные недостатки. В случае микроскопии основная проблема – это локальность получаемой информации. Рентгеновская дифрактометрия, как правило, позволяет определить только средние размеры частиц, имеющих кристаллическую структуру. Метод МУРР, в отличие от ПЭМ и рентгеновской дифрактометрии, позволяет получать распределения частиц по размерам от макроскопических объемов образца независимо от того, какой структурой (кристаллической или аморфной) обладает образец. Это могут быть полимерные нанокомпозиты, «умные стекла», дисперсные катализаторы, сплавы, природные материалы, содержащие часть вещества в виде наноразмерных частиц (например, костная ткань, ископаемые угли и проч.), а также многие другие объекты. Применение источника СИ высокой яркости позволит реализовать методики контраста и аномального рассеяния для экспрессного определения структурно-дисперсных характеристик искомой фазы в многокомпонентных материалах.

Задача 9.2. Определение структуры белков низкого разрешения в растворах, изучение процессов образования белковых агрегатов при разных условиях. Изучение процессов самоорганизации гибридных структур типа ДНК-наночастицы металлов (ИК СО РАН, ИФМХБ СО РАН, ИЦиГ СО РАН, НГУ, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Использование источника СИ высокой яркости позволит проводить анализ нативных белковых структур непосредственно в растворе, т.к. яркости рентгеновских источников лабораторных малоугловых дифрактометров для подобных объектов, как

правило, не достаточно, поскольку для таких объектов наблюдается очень слабое рассеяние. Специализированные малоугловые станции по исследованию биополимеров в растворах (такие как, P12 EMBL BioSAXS Beamline, Hamburg) загружены большим количеством биологических образцов, что свидетельствует о высокой актуальности и востребованности подобных исследований. В качестве одного из ярких примеров потенциальных возможностей данного направления можно привести ряд работ по структурной характеризации методом МУРР амилоидных агрегатов *In Vitro,* являющихся, согласно одной из распространенных точек зрения, основной причиной нейродегенеративных заболеваний (болезнь Альцгеймера). При этом использование других методов для анализа образования таких агрегатов в растворах по разным причинам малоэффективно. Дело в том, что метод МУРР позволяет проводить исследования зависимости конформации биологических структур от состава, концентрации, температуры, PH и других свойств буфера, в котором находится исследуемый объект. (Подобную информацию белковая кристаллография не может дать в принципе). А низкое пространственное разрешение метода может быть скомпенсировано сочетанием МУРР с методами молекулярного дизайна, т.к. первичная (а также вторичная) структура молекул часто бывает известна. Именно таким способом была найдена третичная структура аптамера PE31 к тромбину. Также в литературе имеется большое количество сообщений о создании гибридных агрегатов (биополимер-неорганическая наночастица), имеющих потенциально широкий круг всевозможных применений в медицине (от диагностики до лечения). Метод МУРР лучше всего подходит для характеризации таких объектов при приготовлении и их трансформации в процессе использования, поскольку измерение происходит непосредственно в водной среде с высоким временным разрешением.

Задача 9.3. Исследование синтетических полимеров, их растворов и расплавов (ИК СО РАН, НИОХ СО РАН, НГУ)

Метод МУРР позволяет эффективно анализировать растворы и расплавы синтетических полимеров и получать информацию о размерах полимерных молекул в растворах, конформациях полимерных молекул при смене растворителя или изменении температуры. Методом МУРР *In Situ* также возможно анализировать кинетику роста полимерной цепи в растворе. Важной задачей является переработка полимеров, поэтому метод МУРР также способен анализировать процессы деструкции полимеров при их терморастворении. Кроме того, механическое воздействие на твердые полимеры (сжатие-растяжение) также проявляется при малоугловом рассеянии, поэтому таким образом возможно проанализировать изменение структуры полимера в зависимости от

прилагаемой нагрузки. Существует ряд работ, в которых подобные измерения были проведены на нитях шелка в зависимости от прилагаемой нагрузки, температуры и влажности окружающей среды. Подобный подход к исследованиям волокон, армированных нанотрубками, способен помочь продвинуться в создании сверхпрочных материалов.

Задача 9.4. Исследование жидких дисперсных систем (ИК СО РАН, НГУ)

Метод МУРР является практически единственным методом для структурно-дисперсной характеризации жидких дисперсных систем. Существует много важных задач, для решения которых будут востребованы возможности данного метода:

а) Исследование процессов образования и старения золей. Значительная часть нанодисперсных систем получается через стадию первичного образования золя. Далее после процессов коагуляции и/или сушки с последующей термообработкой получается высокодисперсный/пористый материал. При этом стадия получения золей, их стабильность и механизмы агрегации частиц слабо изучены, в первую очередь, из-за малой доступности метода МУРР, позволяющего анализировать размеры и форму частиц дисперсной фазы с высоким временным разрешением, поскольку зачастую эти процессы протекают очень быстро. Поэтому использование метода МУРР для анализа процесса получения золей и их трансформации позволит получить новые данные, позволяющие существенно улучшить или упростить методы синтеза нанодисперсных систем.

б) Изучение различных жидкостей, содержащих наночастицы, для оптимизации процессов их получения, а также исследование в них процессов старения и деградации. К таким объектам можно отнести магнитные жидкости, наножидкости (nanofluids), различные виды чернил и лакокрасочных материалов, суспензии квантовых точек в растворах и др. Метод МУРР поможет дать ответы на прикладные вопросы по приготовлению и стабильности таких жидкостей.

в) Исследование нефтяных дисперсных систем. Важной прикладной задачей для транспортировки нефти различных марок, является обеспечение их устойчивости при образовании нефтяных смесей для совместной транспортировки в целях снижения транспортных издержек. Тем не менее, в ряде случаев, при смешении нефтей или изменении их условий хранения возможно выпадение асфальтеновых отложений, препятствующих их дальнейшей транспортировке. Изучение размеров асфальтеновых агрегатов в нефтяных системах и их эволюция при различных манипуляциях с нефтями (разбавление нефтяными дистиллятами, добавки депрессорных присадок, нагрев и

проч.) позволит понять, что происходит при смешении таких несовместимых нефтей и как предотвращать выпадение отложений.

г) Исследование дисперсных систем жидкость-жидкость. Подобные суспензии имеют широкое применение в пищевой и фармацевтической промышленности, причем свойства получаемых дисперсных систем и их стабильность сильно зависят от размеров диспергированной жидкости. Метод МУРР является эффективным методом для экспрессного анализа данных систем.

Задача 9.5. Изучение процессов трансформации пористой структуры различных материалов при воздействии температур и давления (изучение реакций жидкость или газ - твердое тело, изучение топохимических реакций, синтез/деструкция/адсорбция MOF, процессы, происходящие в сверхкритических условиях, переработка природных материалов, влияние электрохимических процессов на текстуру пористых электродов) (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, НГУ)

Для пояснения актуальности этой задачи можно привести несколько примеров:

а) В последнее время получили высокую популярность металл-органические каркасные структуры (устойчивое англоязычное название – MOF, metal organic framework): пористые каркасные материалы, обладающие многими ценными свойствами (например, они представляют интерес для хранения водорода и разделения газовых смесей). Как правило, синтез таких материалов проводят в гидротермальных условиях. Традиционный способ управления синтезом таких материалов заключается в варьировании состава продуктов, температуры и давления, с последующим анализом получаемых продуктов. Проведение такого эксперимента методом малоуглового рассеяния синхротронного излучения *In Situ* позволит ускорить выявление основных факторов, влияющих на главный и побочные пути протекания реакции, и оптимизировать условия синтеза.

б) Начиная с момента создания литий-ионных батарей постоянно ведутся работы по их усовершенствованию. Одним из важных направлений исследований является изучение стабильности пористого углеродного электрода при интеркаляции/деинтеркаляции в него лития в среде органического электролита. Недавно появились работы, в которых этот процесс был изучен методом МУРР *In Situ* и исследовано непосредственное влияние пористости электрода на эффективность процесса работы батареи. Отметим, что эти подобные процессы обычно сложно изучать другими методами, поскольку исследуемые объекты зачастую рентгеноаморфны.

Таким образом, круг задач и объектов для исследования методом МУРР очень обширен и затрагивает многие области науки. Секция МУРР будет потенциально

пригодна для исследования практически любых жидких и твердых дисперсных систем (которые сложно исследовать другими методами), а также переходов, реакций и взаимопревращений дисперсных систем при варьировании температур, давлений и прочих параметров эксперимента.

Для реализации методов, необходимых для решения поставленных задач, а также наиболее рационального использования излучения, генерируемого вставным устройством, на станции «Структурная диагностика» планируется организация четырёх параллельно функционирующих секций: «Дифрактометрия высокого разрешения», «Монокристальный РСА», «Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах», «Малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР)». Общая схема распределения задач по секциям станции «Структурная диагностика» приведена в Таблице 2.1.1.2.

Таблица 2.1.2.1 Распределение задач по секциям станции «Структурная диагностика»

	Секция «Дифрактометрия высокого разрешения»	Секция «Монокристальный РСА»	Секция «Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах»	Секция «Малоугловое рентгеновское рассеяние»
Блок 1 «Материалы для водородной энергетики и твердотельных топливных элементов»	■		■	■
Блок 2 «Катализаторы для энергоэффективного катализа, нефтепереработки и экологических приложений»	■		■	■
Блок 3 «Керамические и высокоэнергетические материалы»	■		■	■
Блок 4 «Пленки»	■			■
Блок 5 «Системы с частично-разупорядоченной иерархической структурой: полимерные и углеродные материалы»			■	■
Блок 6 «Фармацевтические материалы»	■	■	■	■
Блок 7 «Монокристаллы»		■		
Блок 8 «Структурная диагностика ультрадисперсных и наноструктурированных систем»	■	■	■	■
Блок 9 «Структурная диагностика с использование метода малоуглового рассеяния»				■

Режимы работы устройства генерации СИ

Одновременная организация на станции «Структурная диагностика» нескольких исследовательских секций (рис. 2.1.2.1), использующих различные аналитические методы, требует установки вставного устройства генерации СИ с высокой яркостью и возможностью перестройки энергетического диапазона. В качестве вставного устройства планируется использовать сверхпроводящий ондулятор, либо ондулятор на постоянных магнитах. Работа вставного устройства предполагается в двух режимах:

1. Основной.

В данном режиме работы ондулятора энергия первой гармоники составляет 2.5 кэВ. Основные гармоники в данном режиме, планируемые для использования на секциях станции, представлены в таблице 2.1.2.1.

Таблица 2.1.2.2 Использование гармоник ондулятора на секциях станции «Структурная диагностика»

Гармоника	Энергия, кэВ	λ, Å	Секция
1	*2.5*	4.96	-
3	7.5	1.65	Дифрактометрия высокого разрешения (низкоинтенсивная)
5	12.5	0.99	Малоугловое рентгеновское рассеяние
7	17.5	0.71	Дифрактометрия высокого разрешения
9	22.5	0.55	Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах
11	27.5	0.45	Дифрактометрия высокого разрешения
13	32.5	0.38	Монокристальный РСА
15	37.5	0.33	Малоугловое рентгеновское рассеяние (побочн.)
17	42.5	0.29	Дифрактометрия высокого разрешения
19	47.5	0.26	Дифрактометрия высокого разрешения

2. Дополнительный.

Для проведения исследований с использованием эффекта аномального рассеяния на секции «Дифрактометрия высокого разрешения» для энергий, отличных от максимумов спектра ондулятора в основном режиме работы, необходимо изменение магнитного поля ондулятора. В этом случае секции «Монокристальный РСА»,

«Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах», «Малоугловое рентгеновское рассеяние» в работе не задействованы.

Оптическая схема станции «Структурная диагностика» представлена на рис. 2.1.2.1.

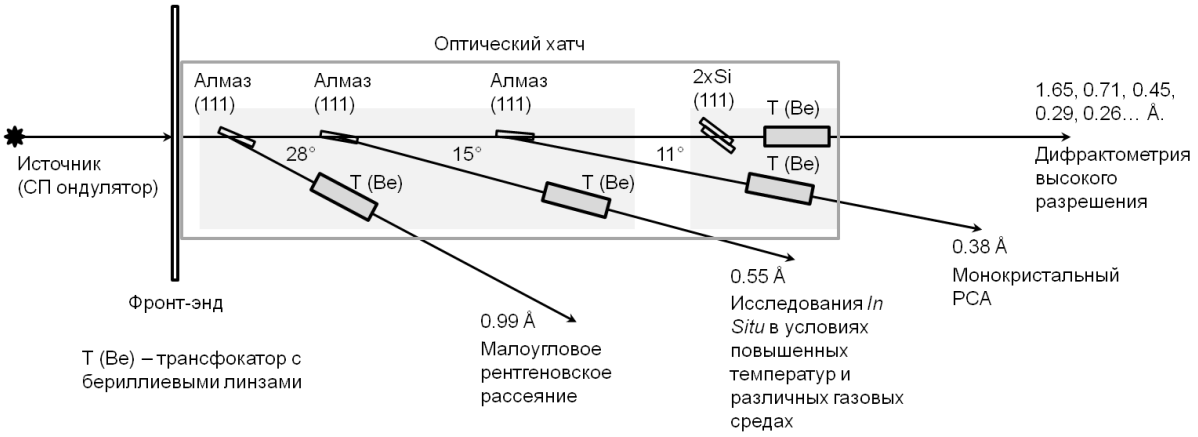

Рисунок 2.1.2.1. Принципиальная оптическая схема станции «Структурная диагностика».

1. Секция «Дифрактометрия высокого разрешения»

В секции реализуется самый широкий комплекс дифракционных методик, предполагающих проведение исследований в режиме высокого инструментального разрешения с возможностью варьирования рабочей энергии излучения. Объектами исследования могут быть синтетические, геологические, биологические соединения и функциональные материалы разнообразного назначения. Опция варьирования длины волны позволяет реализовать метод аномального рассеяния на определенных атомах с целью их локализации в структуре. Секция обеспечивает возможность проведения практически любых дифракционных исследований в широкоугловой и частично малоугловой областях. Образцы могут представлять собой порошковые или компактированные поликристаллические материалы, пленки, монокристаллы малых размеров, коллоиды, суспензии и т.д.

Данная секция будет располагаться на прямом пучке после отведения от него гармоник на секции «Монокристальный РСА», «Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах», «Малоугловое рентгеновское рассеяние» (рис. 2.1.2.1). В основном режиме работы вставного устройства это 7.5 кэВ (1.65 Å), 17.5 кэВ (0.71 Å), 27.5 кэВ (0.45 Å), 42.5 кэВ (0.29 Å), 47.5 кэВ (0.26 Å). Смена рабочей энергии осуществляется с помощью двухкристального кремниевого монохроматора с фиксированным выходом, установленного в оптическом хатче. Съемка

образцов планируется в геометриях «на просвет» (капилляр или тонкая пластина) и «на отражение» (произвольная форма образцов). Возможно также проведение исследований приповерхностных слоёв образца в режиме скользящего падения излучения. Для регистрации дифракционной картины будет использован специализированный многоканальный прецизионный дифрактометр производства NewPort, оборудованный пятью секциями, включающими по 9 каналов регистрации каждая с кристаллами-анализаторами и полупроводниковыми или сцинтилляционными детекторами, всего 45 каналов регистрации дифрагированного излучения. Для проведения экспериментов с пониженным угловым, но повышенным временны́м разрешением будет использован однокоординатный позиционно-чувствительный рентгеновский детектор. Для работы в жёсткой области спектра (45 кэВ и выше) предполагается установить двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор типа Dectris EIGER2 X CdTe 16M. В качестве вспомогательного оборудования для решения вышеуказанных задач на секции будут использованы система автоматической смены образцов, высокотемпературные и низкотемпературные камеры, криосистема для охлаждения образцов потоком газообразного азота. Также предполагается размещение масс-спектрометра для контроля состава продуктов каталитических реакций. На секцию планируется подвод газовых магистралей с азотом, инертными газами. Газы для приготовления каталитических смесей – CO, метан, кислород, водород и др. предполагается использовать в баллонах. Необходим также подвод магистрали с жидким азотом, который будет использоваться для охлаждения образцов в ходе эксперимента. Схема секции представлена на рис. 2.1.2.2.

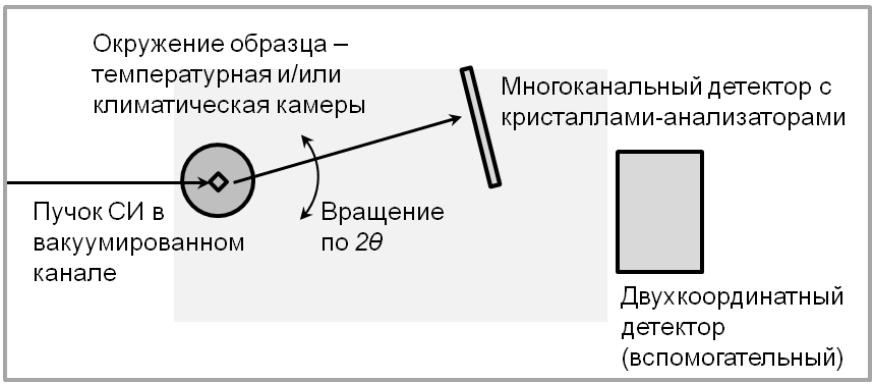

Рисунок 2.1.2.2. Принципиальная схема секции «Дифрактометрия высокого разрешения».

2. Секция «Монокристальный РСА»

Для реализации метода монокристального рентгеноструктурного анализа планируется вывод из первичного пучка гармоники с энергией 32.5 кэВ (0.38 Å). Секция монокристальной дифракции ориентирована на определение кристаллической структуры образцов, исследование которых с использованием стандартных лабораторных дифрактометров по определенным причинам (малый размер, малое время жизни и т.д.) крайне затруднено либо полностью не реализуемо. Для реализации метода монокристальной дифракции необходимо наличие монокристального гониометра и 2D детектора.

В качестве решения данной задачи предлагается использовать интегрированное решение mardtb «desktop beamline» от компании marXperts - монокристальный гониометр с функцией автоматической установки и центрировки образца, систему автоматической юстировки положения гониометра относительно пучка синхротронного излучения и 2θ привод с креплениями для детектора СИ. Предложенное решение позволяет использовать различные детекторы и при необходимости быстро производить их замену. В качестве основного детектора будет использоваться CCD детектор Rayonix SX-165, обладающий высокой надежностью. Для экспериментов, требующих высокой скорости съемки (нестабильные кристаллы) либо низкого фонового шума (диффузное рассеяние) будет использоваться гибридный (HPC) детектор Dectris Pilatus3 1M. Для контроля температуры образца будет использоваться потоковый криостат (например, Oxford Cryosystems Cryostream 800). Оба предложенных детектора и потоковый криостат штатно интегрируются в систему mardtb, что позволяет отказаться от каких-либо дополнительных приспособлений для крепления и юстировки компонентов линии монокристального излучения. Схема секции представлена на рис. 2.1.2.3.

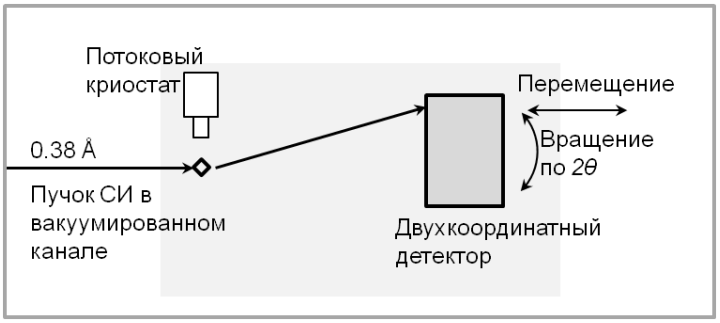

Рисунок 2.1.2.3. Принципиальная схема секции «Монокристальный РСА».

3. Секция «Исследования In Situ в условиях повышенных температур и в различных газовых средах»

Секция предназначена для проведения массовых дифракционных исследований поведения веществ и материалов в условиях воздействия высоких температур в различных газовых средах. Важнейшая область исследований – химические и фазовые превращения катализаторов, в том числе, в условиях протекания химических каталитических реакций. Наличие возможностей регистрации состава газообразных продуктов реакции обеспечивает возможность проведения исследований в условиях *Operando*, сопоставляя структурные состояния катализатора с его каталитической активностью и селективностью по отношению к определенным продуктам. Другие исследования, требующие контроля фазового состава, структуры и микроструктуры объектов в условиях *In Situ*, как например, исследования структурной стабильности материалов, используемых в качестве кислородпроводящих мембран, также могут быть выполнены на оборудовании этой секции.

Для исследований *In Situ* планируется вывод из первичного пучка компоненты с энергией 22.5 кэВ (0.55 Å). Съемка образцов планируется преимущественно в капиллярах, для чего необходимо предусмотреть вращение образца вокруг оси капилляра. Регистрация дифракционной картины осуществляется высокоскоростным двухкоординатным детектором (может быть использован DECTRIS PILATUS3 X CdTe 2M). Для различных типов образцов и для регистрации дифракции на больших углах будет предусмотрено варьирование расстояния образец-детектор, а также перемещение детектора в вертикальной плоскости, в направлении, перпендикулярном исходному пучку рентгеновского излучения.

В качестве вспомогательного оборудования для решения вышеуказанных исследовательских задач на секции будут использованы система автоматической смены образцов, высокотемпературные и низкотемпературные камеры, криосистема для охлаждения образцов потоком газообразного азота. Также предполагается размещение масс-спектрометра для контроля состава продуктов каталитических реакций. На секцию планируется подвод газовых магистралей с азотом, инертными газами. Газы для приготовления каталитических смесей – CO, метан, кислород, водород и др. предполагается использовать в баллонах. Необходим также подвод магистрали с жидким азотом, который будет использоваться для охлаждения образцов в ходе эксперимента. Схема секции представлена на рис. 2.1.2.4.

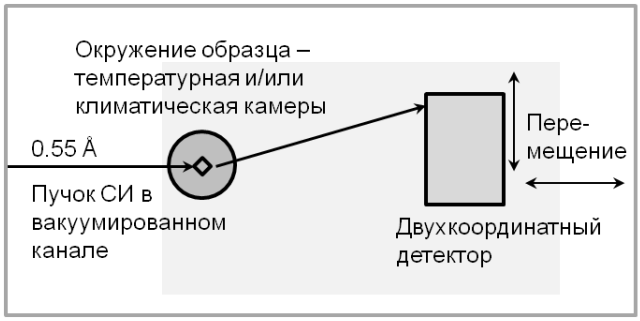

Рисунок 2.1.2.4. Принципиальная схема секции «Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и в различных газовых средах».

4. Секция «Малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР)»

Методом МУРР могут быть решены следующие задачи:

1) Определение размеров частиц, распределения частиц по размерам, формы частиц и образования иерархических структур; селективное определение размеров частиц заданной фазы в многофазных объектах с использованием эффекта аномального рассеяния;
2) Исследование полимеров в любом агрегатном состоянии, кинетики роста полимерной цепи; анализ структуры полимеров при их растяжении и сжатии;
3) Исследование коллоидных растворов, старения золей, переходов золь-гель, структуры мицелл и их трансформации с разрешением по времени; диагностика формирования и эволюции супрамолекулярных структур сорбентов и катализаторов;
4) Исследование изменения структур вышеперечисленных объектов при воздействии температур, давлений, реакционных сред в режимах *In Situ* и *Operando*; исследование реакций «жидкость или газ – твердое тело», изучение кинетики нуклеации и роста частиц при осаждении частиц из жидкой фазы.

Естественная коллимация пучка СИ и применение сравнительно простых оптических элементов позволяет проводить исследования методом МУРР с повышенным угловым разрешением, а высокий поток фотонов обеспечивает возможность выполнения экспериментов с разрешением по времени. Особенности спектрально-углового распределения излучения источников СИ с малым эмиттансом откроет доступ к области ультрамалых углов рассеяния, повышая тем самым диапазон размеров исследуемых объектов.

Для реализации метода малоуглового рентгеновского рассеяния планируется вывод из первичного пучка компоненты с энергией 12.5 кэВ (0.99 Å). Пучок СИ с данной энергией является универсальным и подойдет для исследований широкого круга образцов, от неорганических материалов до биологических объектов. Для регистрации

рассеянного излучения будет использован двухкоординатный детектор (может быть использован DECTRIS PILATUS3 S 2M). В качестве вспомогательного оборудования для решения вышеуказанных исследовательских задач на секции будут использованы система автоматической смены образцов, высокотемпературные и низкотемпературные камеры, криосистема для охлаждения образцов потоком газообразного азота. Также предполагается размещение масс-спектрометра для контроля состава продуктов каталитических реакций. На секцию планируется подвод газовых магистралей с азотом, инертными газами. Газы для приготовления каталитических смесей – CO, метан, кислород, водород и др. предполагается использовать в баллонах. Необходим также подвод магистрали с жидким азотом, который будет использоваться для охлаждения образцов в ходе эксперимента. Схема секции представлена на рис. 2.1.2.5.

Рисунок 2.1.2.5. Принципиальная схема секции «Малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР)».

Принципиальная рентгенооптическая схема секции

1. Разделение и монохроматизация пучков СИ

Для одновременного функционирования всех секций и эффективного использования спектра вставного устройства будет применена система вывода из первичного пучка необходимых гармоник тремя алмазными монохроматорами (111) по Брэггу, по аналогии со станцией «Микрофокус». При этом высшие гармоники излучения проходят через алмазные монохроматоры с минимальным поглощением и используются на секции «Дифрактометрия высокого разрешения».

Первый алмазный (111) монохроматор выводит пучок на секцию «Малоугловое рентгеновское рассеяние», обеспечивая энергию 12.5 кэВ (0.99 Å) при $2\theta = 28°$.

Второй алмазный (111) монохроматор выводит пучок на секцию «Исследования *In Situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах», обеспечивая энергию 22.5 кэВ (0.55 Å) при $2\theta = 15°$.

Третий алмазный (111) монохроматор выводит пучок на секцию «Монокристальный РСА», обеспечивая энергию 32.5 кэВ (0.38 Å) при $2\theta = 11°$.

Более жёсткое рентгеновское излучение, а также гармоника 7.5 кэВ (1.65 Å) проходят через три алмазных (111) монохроматора и попадают на двухкристальный кремниевый (111) монохроматор с фиксированным выходом, пучок с которого используется на секции «Дифрактометрия высокого разрешения».

Все монохроматоры планируется охлаждать жидким либо газообразным азотом, поэтому необходим подвод к оптическому хатчу станции магистрали с жидким азотом. Всего на канале будет задействовано 4 монохроматора. В оптический хатч планируется установка монолитных платформ, а также системы каналов для пучков, заполненных гелием.

Подавление гармоник высшего порядка на всех секциях может осуществляться двумя путями: установкой дополнительных плоских зеркал или рефрактивной оптики.

2. Фокусировка пучков

Первичная фокусировка пучка может осуществляться блоком алмазных линз, установленным непосредственно во фронтэнде. Финальная фокусировка для каждой секции станции будет осуществляться наборами бериллиевых линз с переменным фокусным расстоянием (трансфокаторами), установленными в оптическом хатче. В качестве дополнительных фокусирующих элементов могут использоваться поликапиллярные линзы.

Всего на канале будет задействовано 5 основных оптических элементов: алмазные линзы (1 комплект) и бериллиевые трансфокаторы (4 комплекта).

3. Контроль пучков

Для контроля пучков планируется использовать позиционно-чувствительные ионизационные камеры (до и после каждого оптического элемента), а также рентгеночувствительные видеокамеры.

Для решения задач экспериментальной станции «Структурная диагностика» и обеспечения указанных выше режимов работы в качестве устройства генерации излучения возможно использовать ондулятор типа 1 (см. таблица 2.3.3). В основном режиме работы поле в ондуляторе B = 1,06 Тл (K = 1,54), используются 5-я и более жесткие нечетные гармоники с энергией ≥ 12,5 кэВ. Для проведения исследований с использованием эффекта аномального рассеяния на секции «Дифрактометрия высокого разрешения» для энергий, отличных от максимумов спектра ондулятора в основном режиме работы, необходимо изменение магнитного поля ондулятора.

2.1.3. Станция исследования быстропротекающих процессов

Экспериментальная станция предназначена для исследования быстропротекающих процессов в веществе, а также поведения вещества и материалов в условиях мощных импульсных воздействий лазерного излучения, взрыва, ударных волн, плазмы и направленных потоков частиц. Измерительное оборудование будет оптимизировано для проведения рентгенографических и дифракционных измерений с высоким временным разрешением вплоть до регистрации сигнала с каждого банча.

Планируется, что комплекс исследовательских работ будет выполняться на трех секциях экспериментальной станции: Секция динамических процессов, Секция «Плазма», Секция экстремально высоких температур.

Блок задач 1. Научные задачи Секции динамических процессов (ИХТТМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ, ИПХФ РАН, ИПХЭТ СО РАН)

Конденсированные взрывчатые вещества или в более широком современном смысле - энергетические материалы, являются бесконкурентным источником энергии в случаях, если необходимы компактные размеры и большие импульсные мощности. Несмотря на потенциальную опасность несчастных случаев и возрастающие требования к безопасности в ряде областей взрывчатые материалы не имеют альтернатив и будут продолжать применяться.

Детальное понимание механики и химии взрывных и ударно-волновых процессов позволит решить ряд проблем в области безопасности эксплуатации и эффективности работы устройств и технологий, использующих энергию взрыва, в том числе безопасность и гарантия работоспособности специальных зарядов; будут решаться задачи противодействия терроризму; исследования новых материалов с высокой удельной энергоемкостью для ракетной промышленности; синтез новых соединений в условиях взрыва; взрывной синтез наночастиц углерода с заданными свойствами.

Основное направление работ на секции - исследование поведение вещества при интенсивных динамических воздействиях в условиях взрыва и импульсного лазерного излучения, в том числе, изучение:

- структуры ударного и детонационного фронта, фазовых переходов при сжатии, протекание химических реакций, динамического формирования наноструктур;
- скоростного деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций;

- поведения вещества и плотной плазмы в условиях, максимально приближенных к инерционному термоядерному синтезу.

На основе полученных данных будет проводиться реконструкция микро- и макроскопических свойств энергетических материалов, которая позволит решить фундаментальную задачу разработки уравнений состояния энергетических материалов, получить практические знания о распространении ударных и детонационных волн в веществе с учётом формы изделий и масштабных эффектов, а также разработать и развить инновационные методы исследования плотной плазмы в условиях, максимально приближенных к инерционному термоядерному синтезу.

Блок задач 2. Научные задачи Секции «Плазма» (ИЯФ СО РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, НИЦ «Курчатовский институт», Проектный центр ИТЭР)

Секция «Плазма» ориентирована на исследование воздействия плазмы на материалы в термоядерном реакторе. Особенность этого воздействия в многообразии происходящих процессов: материалы подвергаются одновременно постоянным и импульсным тепловым нагрузкам, воздействию потоков водорода и тяжёлых примесей, поток термоядерных нейтронов и так далее.

Для модерирования проходящих процессов на секции «Плазма» предлагается воспроизвести постоянную и периодическую импульсную тепловую нагрузку при помощи мощных лазерных импульсов. Разработанные в последнее время мощные (сотни тераватт) лазеры с короткими импульсами позволяют создавать на поверхности вещества рекордные плотности энергии, которые в лабораторных условиях не могут быть созданы никакими другими способами. Это обстоятельство делает мощные лазерные системы весьма перспективным инструментом для исследования вещества в плазменном состоянии с экстремально высокими плотностями энергии. На планируемой установке предполагается получать ударные волны интенсивностью более 300 ГПа.

Исследование динамики деформаций и напряжений в материалах при импульсной тепловой нагрузке даст ответы на вопросы о механизмах механического разрушения материалов, эрозии материалов первой стенки термоядерного реактора.

Полученные экспериментальные данные о поведении вещества в условиях высоких давлений и температур необходимы для расчетов и создания термоядерных установок, для построения уравнений состояния вещества в сверхплотных состояниях и прогнозирования поведения различных веществ в условиях воздействия плазмы.

Блок задач 2. Научные задачи Секции экстремально высоких температур (ИХТТМ СО РАН, ИТ СО РАН, ОИВТ РАН)

Секция ориентирована на проведения исследований атомной структуры и фазовых переходов при температурах от комнатной до 5 000 С. Основными задачами, которые будут решаться, являются:

- изучение протекания синтеза высокотемпературных материалов (оксидов, боридов и карбидов) в процессе электронно-лучевого и лазерного воздействия;
- поиск условий получения высокотемпературных композиционных материалов для деталей гиперзвуковых и космических летательных аппаратов, а также для нужд ядерной энергетики;
- материаловедческие задачи по исследованию процессов отжига, рекристаллизации, текстурирования при высоких температурах.

Полученная информация позволит найти наиболее эффективные режимы электронно-лучевой и лазерной обработки высокотемпературных материалов, найти наиболее подходящие условия получения высокотемпературных композиционных материалов (в том числе, покрытий), изучить воздействие высоких температур на материалы.

Принципиальная рентгенооптическая схема станции.

Общая длина экспериментальной станции составляет около 110 метров с учётом длины фронтэнда (рис. 2.1.3.1). В текущей схеме оборудование находится на одном канале без ветвлений, т.е. оптический хатч, секции экстремально высоких температур, «Плазма» и динамических процессов находятся на одной линии, при этом Секция динамических процессов находится за границей основного кольца экспериментального холла в одном из вспомогательных зданий.

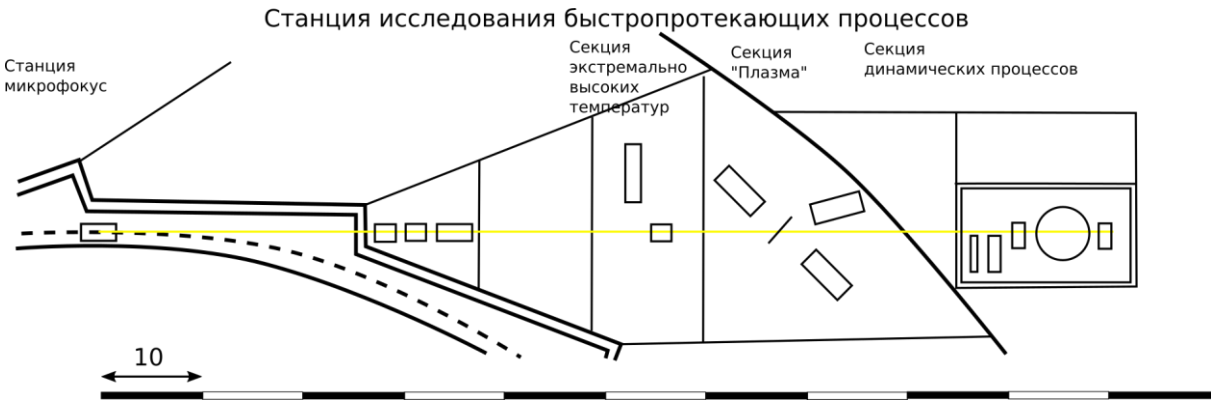

Рисунок 2.1.3.1. Принципиальная схема Станции исследования быстропротекающих процессов.

Необходимо отметить важные особенности экспериментальной станции:

1. Прямолинейный участок основного кольца накопителя, в который устанавливаются устройства генерации СИ должен иметь свободную длину не менее 6 метров, поскольку после запуска экспериментальных работ в основном режиме с использованием излучения из вигглера, планируется изучить вопрос и рассмотреть возможность установки в этот промежуток ондулятора.
2. Секция динамических процессов будет иметь особый режим доступа.

1. Секция динамических процессов.

На секции будут реализованы следующие экспериментальные методики (иллюстрация на рис. 2.1.3.2):

- скоростная рентгенография и томография;
- дифракция с высоким временным разрешением.

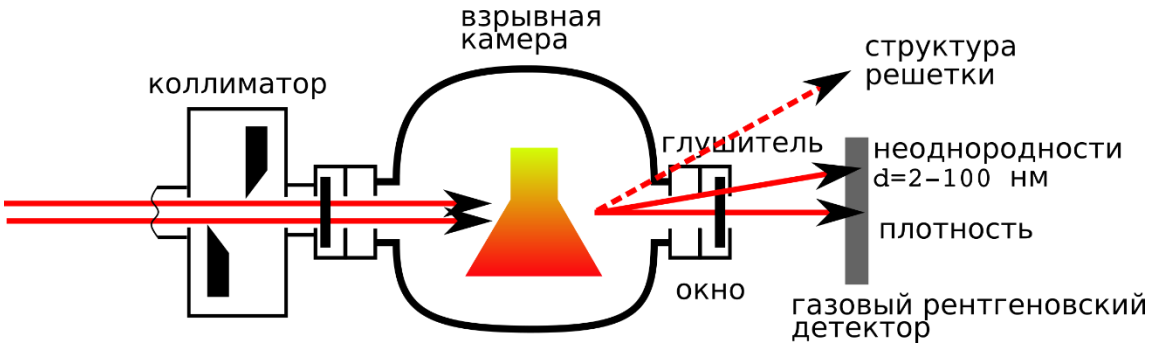

Рисунок 2.1.3.2. Схема проведения экспериментов в Секции динамических процессов.

Принципиальная схема размещения оборудования секции представлена на рис. 2.1.3.3.

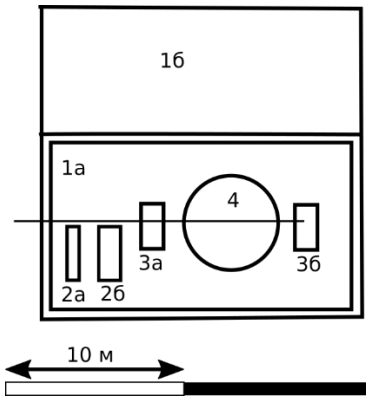

Рисунок 2.1.3.3. Принципиальная схема размещения оборудования Секции динамических процессов: 1а – взрывозащитное помещение, 1б – вспомогательное помещение, 2а – одностадийная пневматическая пушка калибром 20 мм, 2б – двухстадийная пневматическая пушка калибром 60 мм, 3а, б – детекторы рентгеновского излучения, 4 – взрывная бронекамера.

Высокая стабильность, пространственное и временное разрешение излучения позволит проводить количественные изменения массы на луче просвечиваемого объекта. В ряде случаев, используя цилиндрическую симметрию течения, возможно решение задачи одноракурсной томографии и восстановления внутренней структуры исследуемого объекта (рис. 2.1.3.4).

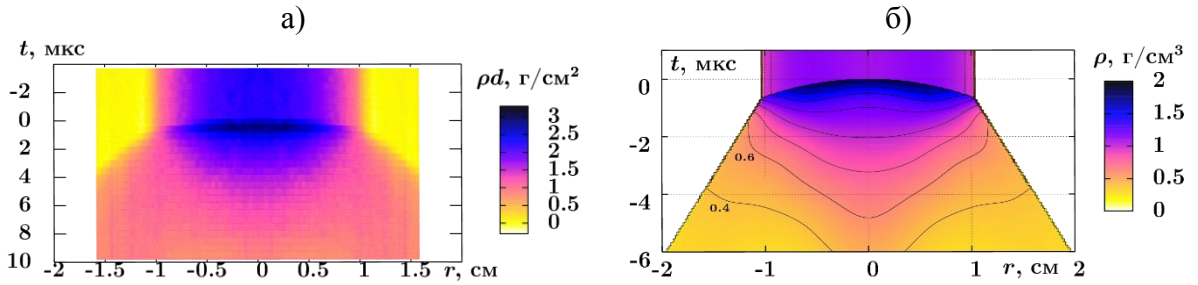

Рисунок 2.1.3.4 Результаты исследования детонации цилиндрического заряда эмульсионного взрывчатого вещества на основе аммиачной селитры. Рентгеновская тень и распределение плотности: а) – измеренная рентгеновская тень, б) – восстановленное распределение плотности.

В состав экспериментального оборудования Секции входит одностадийная пневматическая пушка калибром 20 мм, эскиз которой приведён на рис. 2.1.3.5, параметры на установку – в таблице 2.1.3.1 и двухстадийная пневматическая пушка калибром 60 мм, аналог которой приведён на рис. 2.1.3.6, параметры на установку – в таблице 2.1.3.2.

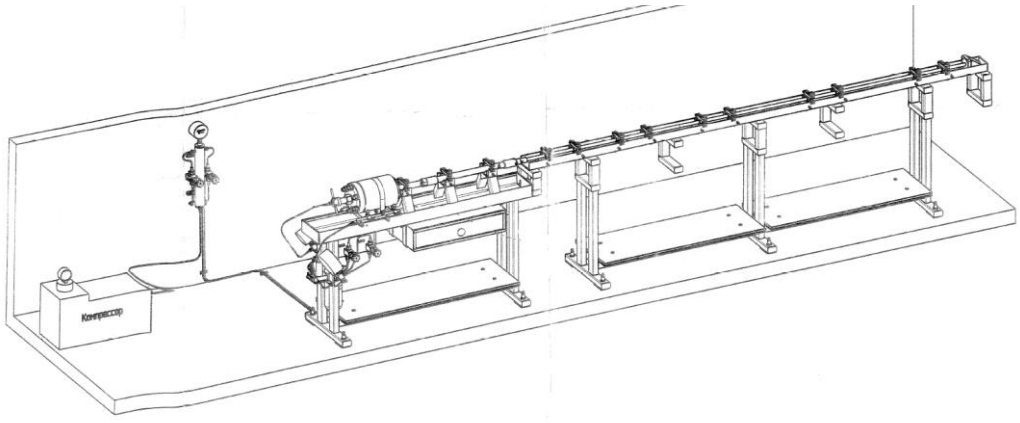

Рисунок 2.1.3.5. Эскиз одностадийной пневматической пушки калибром 20 мм.

Таблица 2.1.3.1. Условия, необходимые для работы одностадийной пневматической пушки калибром 20 мм.

Размеры установочной площадки	2 м на 6 м
Электричество, мощность	3 кВт
Сжатый воздух	Насос и баллон на 100 атм
Вытяжка	20 м^3/мин

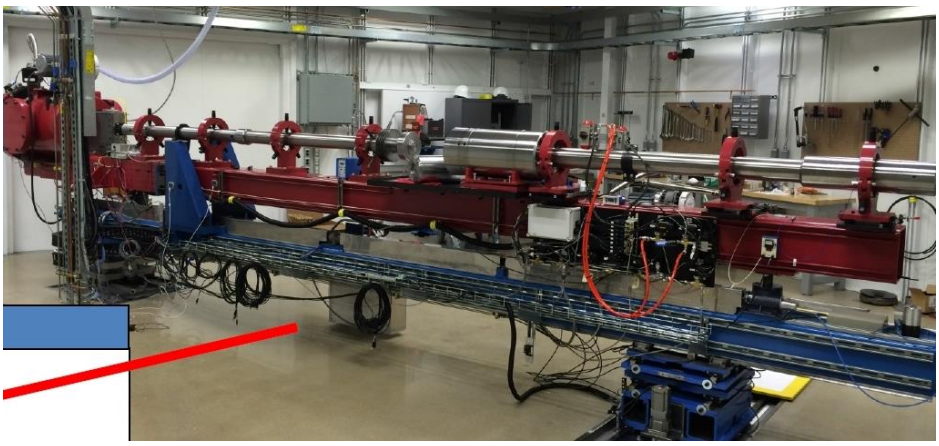

Рисунок 2.1.3.6. Аналог двухстадийной пневматической пушки калибром 60 мм.

Таблица 2.1.3.2. Условия, необходимые для работы двухстадийной пневматической пушки калибром 60 мм.

Размеры установочной площадки	2 м на 10 м
Электричество, мощность	4 кВт
Сжатый воздух	Насос и два баллона на 100 атм
Вытяжка	20 $м^3$/мин
Дополнительные требования	стена (со стороны уловителя образца) должна быть бетонной толщиной 0,5 м

Взрывная камера (ВК) должна располагаться в отдельном боксе, параметры которого и условия эффективного функционирования приведены в таблице 2.1.3.3.

Таблица 2.1.3.3. Условия на размещение взрывной камеры в специализированном боксе.

Размеры комнаты, длина на ширину	6 м на 10 м
ВК из нержавеющей стали	2 кг ВВ, регулируемая подставка
Габаритные размеры ВК	Длина - 4 м, ширина 6 м (с учетом открывания двери)
Вес	20 т
Гидравлика	Местный насос на 100 атм
Электричество, мощность	6 кВт
Сжатый воздух	магистраль на 5 атм
Вытяжка	40 куб м /мин + фильтры
Дополнительные требования	1. Стены хатча взрывобезопасные, бетонные толщиной 0,5 м 2. Фундамент ВК должен быть ниже уровня пучка СИ на 2 м. 3. Крыша хатча должна быть разборной для установки ВК весом 20 т.

2. Секция «Плазма».

На Секции планируется реализовать следующие методики:

- Быстрая дифрактометрия монокристаллов на просвет. Динамика распределения деформаций по глубине будет измеряться по отработанной методике измерения изменения формы и положения дифракционного пика при рассеянии на импульсно нагреваемом монокристаллическом образце. Импульсный нагрев будет проводиться неодимовым лазером.
- Быстрая дифрактометрия поликристаллических образцов на отражение. Динамика напряжений на поверхности поликристаллического образца будет измеряться по изменению положения дифракционных пиков. По изменению угла дифракции будет определяться изменение межплоскостного расстояния, которое линейно связано с упругими напряжениями. Для исключения влияния изотропного расширения при нагреве планируется одновременное измерение изменения угла рассеяния двух дифракционных пиков.

Для генерации интенсивных ударных волн (десятки и сотни ГПа) будет использоваться импульсное лазерное излучение. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 2.1.3.7.

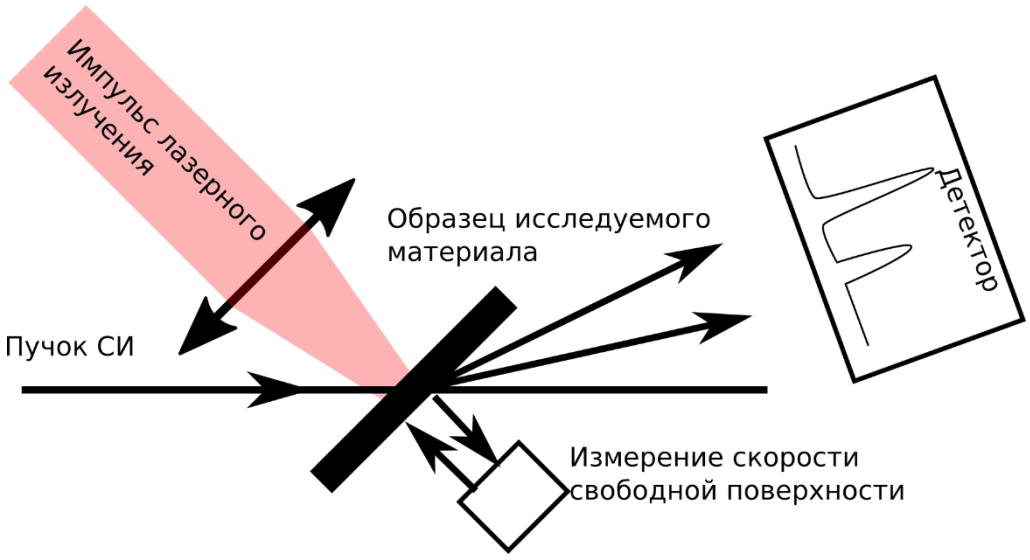

Рисунок 2.1.3.7. Схема проведения экспериментов на секции “Плазма”.

Для измерения массовой скорости и скорости фронта ударной волны в веществе будет использоваться комплекс VISAR, а для определения массовых скоростей вещества планируется скоростная рентгеновская фазо-контрастная съемка (PCI), которая может быть реализована только с использованием возможностей современных источников СИ.

3. Секция экстремально высоких температур.

Принципиальная оптическая схема секции представлена на рис. 2.1.3.8. Предполагается установить специализированное оборудование для нагрева макроскопических образцов размером порядка нескольких миллиметров, а также для реализации возможности воздействия на образец высокоэнергетическими пучками частиц.

Также предполагается реализовать режимы исследования микроколичеств образцов с использованием сфокусированных пучков рентгеновского излучения в различных энергетических диапазонах. Для получения таких пучков в мягком диапазоне энергий предполагается использовать зеркала Киркпатрика-Байеса, в жёстком – трансфокаторы на основе бериллиевых линз.

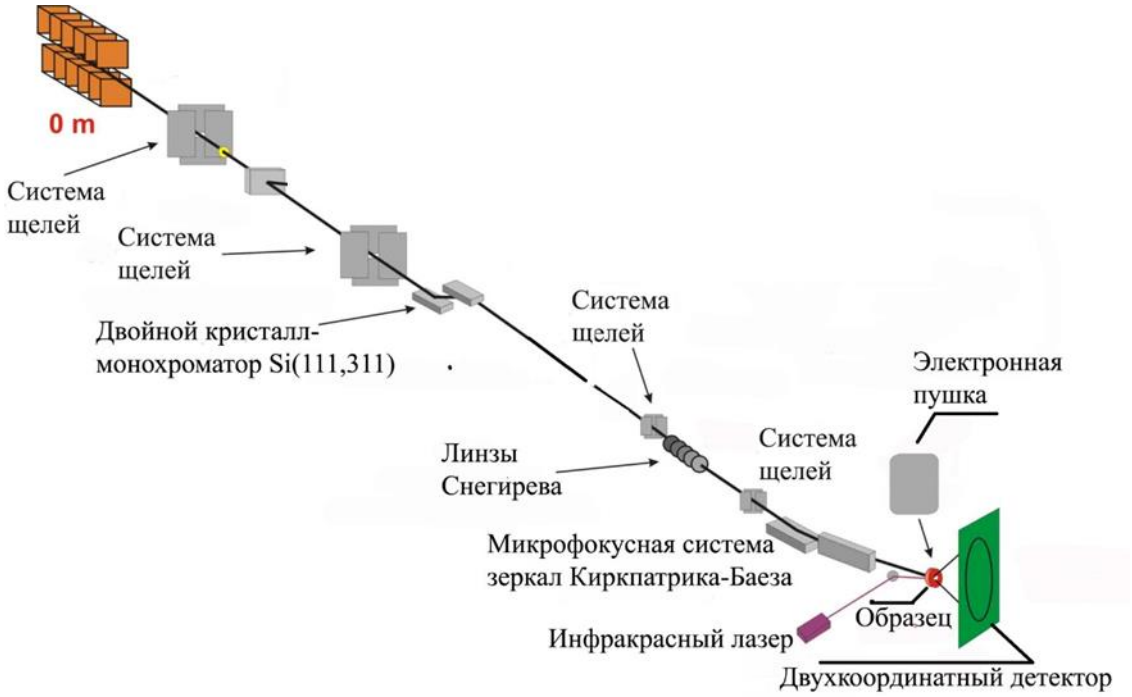

Рисунок 2.1.3.8. Принципиальная оптическая схема секции экстремально высоких температур.

4. Контроль пучков

Для контроля пучков планируется использовать позиционно-чувствительные ионизационные камеры в необходимом количестве.

5. Источник СИ

Первый этап создания экспериментальной станции будет ориентирован на использование излучения из вигглера (п. 2.3.2). Источник и канал будут оптимизированы для задач рентгенографирования “мягких” объектов. Энергия пучка 20-50 кэВ. Исследуемое поле по горизонтали 30 мм и по вертикали 5 мм. Пространственное разрешение на объекте исследования 10-50 мкм. Время между банчами 100 нс.

На втором этапе создания экспериментальной станции вигглер и канал будут оптимизированы для задач рентгенографирования “жестких” объектов. Исследуемое поле по горизонтали 100 мм и по вертикали 10 мм. Пространственное разрешение на объекте исследования 50-100 мкм. Энергия пучка 50-100 кэВ.

На третьем этапе создания экспериментальной станции предполагается размещение ондулятора типа 1 (п. 2.3.3) на оси вигглера в прямолинейном промежутке с возможностью высокой экспозиции за один банч.

2.1.4. Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»

Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» предназначена для проведения экспериментов с использованием спектроскопии рентгеновского поглощения, рентгеновской эмиссионной спектроскопии и спектроскопии магнитного дихроизма. Станция использует сочетание уникального преимущества источника СИ 4-го поколения и последних достижений рентгеновской оптики для решения приоритетных задач фундаментальной и прикладной науки, требующих применения высокоинтенсивных сфокусированных пучков СИ. Станция включает в себя секции спектроскопии рентгеновского поглощения, рентгеновской эмиссионной спектроскопии с высоким энергетическим разрешением и спектроскопии магнитного дихроизма. Дополнительно станция будет оснащена оборудованием, необходимым для проведения исследований с временны́м и пространственным разрешением, в том числе, в режимах *In Situ* и *Operando.*

Среди экспериментальных методов, обеспечивающих информацию о структуре и электронных свойствах вещества, спектроскопия рентгеновского поглощения рассматривается как универсальный метод вследствие ее высокого пространственного, временного и энергетического разрешения. Околопороговая тонкая структура рентгеновских спектров поглощения (X-ray Absorption Near-Edge Structure, XANES) лежит в области энергий от первого незанятого уровня до непрерывного спектра, т.е. примерно от 50 эВ ниже края поглощения до 100 эВ выше края. XANES содержит информацию об электронной структуре, плотности вакантных состояний и геометрии связей поглощающего атома. Протяженная тонкая структура рентгеновских спектров поглощения (Extended X-ray Absorption Fine Structure, EXAFS) представляет собой осцилляции коэффициента рентгеновского поглощения, регистрируемые в диапазоне от 50 до 1200-2000 эВ выше энергии края поглощения, соответствующего ионизации внутреннего электронного уровня атома. Область EXAFS содержит информацию о локальном окружении поглощающего атома, поскольку возникает вследствие рассеяния фотоэлектрона на атомах окружения. Соответственно, спектры EXAFS могут быть использованы для определения окружения поглощающего атома в диапазоне расстояний до 0.6-0.8 нм. Спектроскопия рентгеновского поглощения не требует наличия в исследуемом образце дальнего порядка и может быть применена для исследования вещества в любом агрегатном состоянии. Особенно удобен метод спектроскопии рентгеновского поглощения для исследования наночастиц, коллоидных систем, слабоупорядоченных и аморфных материалов, а также жидкостей и газов.

Спектроскопия поглощения обладает высокой чувствительностью и позволяет проводить эксперименты при очень малых (до 10^{-5}) концентрациях исследуемого элемента, что позволяет исследовать сильноразбавленные системы, такие как катализаторы, примеси в сплавах, металлы в органической матрице, биологические и геологические объекты, метеориты. Также спектроскопия рентгеновского поглощения является элемент-селективным методом, поскольку энергия ионизации внутреннего уровня своя для каждого сорта атомов и отличается от других на сотни эВ, что позволяет анализировать электронную структуру, локальное окружение атомов определенного сорта.

Широкий энергетический диапазон от 4.5 до 75 кэВ, который будет использоваться на станции, включает K-края поглощения элементов с атомным номером Z в диапазоне от 22 (титан) до 76 (осмий). Для более тяжелых элементов с $Z > 76$ спектральные исследования будут выполняться по L-краям поглощения.

Рентгеновская эмиссионная спектроскопия основана на анализе энергий рассеянных фотонов в зависимости от энергии падающего рентгеновского излучения, расширяет диапазон приложений спектроскопии рентгеновского поглощения и снимает некоторые ограничения. Например, спектральное разрешение спектроскопии рентгеновского поглощения составляет порядка 1 эВ для K-краев поглощения в случае переходных металлов и порядка 8 эВ для L-краев поглощения в случае лантаноидов и актинидов. Однако, если принцип, используемый для монохроматизации синхротронного излучения, применить и для энергодисперсионного анализа рассеянных фотонов, то можно существенно поднять спектральное разрешение спектроскопии рентгеновского поглощения. Такой подход позволяет увеличить энергетическое разрешение до 100 мэВ, а также исследовать системы с крайне низкими концентрациями исследуемых элементов (0.001%). Высокое спектральное разрешение позволяет изучать структуру в области края поглощения, в которой содержится информация о химическом и валентном состоянии атома, а также о пространственной симметрии.

Спектроскопия магнитного дихроизма позволяет исследовать фундаментальные магнитные свойства веществ, такие как магнитный гистерезис и магнитная анизотропия, спиновые и орбитальные магнитные моменты атома. Метод анализирует разностный спектр поглощения рентгеновского излучения с левой и правой круговой поляризацией или с линейной вертикальной и горизонтальной поляризацией веществом, находящимся в магнитном поле. Спектроскопия магнитного дихроизма позволяет изучать магнитные свойства таких систем как объемные материалы, тонкие пленки и многослойные гетероструктуры, магнитные наноструктуры и кластеры, системы спинового транспорта.

Использование спектроскопии магнитного дихроизма наряду со спектроскопией рентгеновского поглощения обеспечивает дополнительную информацию об электронной структуре системы, которая представляет интерес для широкого круга научных областей, таких как физика, химия, материаловедение, наука о поверхности, науки о Земле, катализ. Спектроскопия магнитного дихроизма с использованием излучения с круговой поляризацией является важным методом для изучения магнитных свойств материалов, содержащих 3d-переходные металлы, лантаноиды и актиниды. Это единственный элемент-селективный метод, который позволяет разделить вклад спинового и орбитального магнитных моментов каждого типа атомов в суммарную намагниченность многокомпонентных соединений.

Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» будет использована для исследования локальной пространственной, электронной и магнитной структуры кристаллических и аморфных материалов, молекулярных кристаллов, примесей в сплавах, тяжелых элементов в биологической матрице с содержанием анализируемого элемента до 0.001%, жидкостей и газов. Станцию предполагается оснастить необходимым оборудованием для изучения вышеуказанных систем в различных термодинамических и реакционных условиях (высокие давления, различные газовые среды, температуры от 4 до 3000K). Исследования будут охватывать множество научных областей, включая физику твердого тела, материаловедение, геологию, экологию, коллоидную химию, гетерогенный и гомогенный катализ, микроэлектронику. Большинство научных задач, решаемых на станции, имеют прямое или опосредованное отношение к фундаментальным и промышленно мотивированным исследованиям, обозначенным в стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. В частности, переход к новым материалам, переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии, а также фундаментальные исследования, необходимые для создания научного и технологического задела.

Блок задач 1. Катализаторы и каталитические технологии (ИК СО РАН, ИППУ СО РАН, ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, МГУ, ТГТУ, НГУ, СКТБ «Катализатор», «СИБУР», «Газпром-Нефть»)

Катализ играет огромную роль, как в экономике страны, так и в повседневной жизни, являясь структурообразующим и инновационным базисом химической промышленности и смежных отраслей экономики России, а также большинства природоохранных технологий. С помощью каталитических технологий получают

основную часть моторных, реактивных топлив, практически все полимерные материалы, производят серную и азотную кислоты; аммиак, мочевину и карбамид; достигают современные экологические стандарты моторных топлив; повышают октановое число бензинов; производят очистку дымовых и выхлопных газов стационарных (например, ТЭЦ) и мобильных (автомобили) систем. Катализаторы обеспечивают синтез с атомарной точностью сложных органических соединений для нужд фармакологии, сельского хозяйства, лакокрасочной и парфюмерно-косметической промышленности. В химической промышленности в настоящий момент около 90% используемых технологий, обеспечивающих около 10-15% материальной составляющей ВВП России, относятся к каталитическим. В связи с этим обеспечение широкого фронта исследований в области катализа имеет не только научное, но и ярко выраженное практическое значение, так как востребованность в разработке новых высокоэффективных катализаторов и каталитических процессов крайне высока.

Большинство промышленных каталитических процессов являются гетерогенными, когда реагирующие вещества находятся в жидкой или газовой фазе, а катализатор представляет собой твердое веществе, как правило, оксидный носитель с нанесенными металлическими наночастицами. Как известно, металлические наночастицы размером до нескольких десятков нанометров обладают уникальными механическими, оптическими, электронными и каталитическими свойствам по сравнению с объемными системами на основе тех же металлов. Информация об электронных, морфологических, структурных и геометрических особенностях наночастиц является ключевой при ответе на вопросы, касающиеся их каталитических свойств, таких как природа активных центров, причины изменения каталитической активности, селективности и стабильности. Более того, в случае исследования катализаторов на основе наночастиц важно получать информацию об изменении этих свойств непосредственно в ходе протекания каталитического процесса, т.е. в режимах *In Situ* и *Operando*. Определение этих свойств методом рентгеновской дифракции ограничено малым размером наночастиц, что приводит к уширению дифракционных пиков, используемых для уточнения структуры. В свою очередь спектроскопия рентгеновского поглощения является прекрасной альтернативой данному методу благодаря своему пространственному, временно́му и энергетическому разрешению, а также относительной простотой реализации методики проведения *In Situ* и *Operando* экспериментов в широком диапазоне температур и давлений, а также в условиях варьирования состава реакционной смеси.

Одним из основополагающих вопросов в науке о катализе был и остается вопрос об установлении взаимосвязи между пространственной и электронной структурой катализатора и его каталитическими свойствами, среди которых выделяют активность, селективность и стабильность. Действительно, знания об иерархической структуре практически важных катализаторов, о природе процессов ее формирования, активации, функционирования и дезактивации в совокупности с данными о кинетике каталитических процессов являются тем базисом, без которого невозможно разработать научные основы приготовления катализатора, оптимального для целевого практически важного каталитического процесса.

Таким образом, можно сформулировать основные научные задачи, относящиеся к данному блоку:

Задача 1.1. Охарактеризование катализаторов на основе оксидов и нанесенных моно- и биметаллических наночастиц.

Характерными особенностями гетерогенных катализаторов являются, как правило, малое содержание активного компонента (0.001-5%), его высокая дисперсность, малый размер активной фазы, неоднофазность системы, а также возможное наличие фазы взаимодействия активного компонента и носителя. Данные особенности делают невозможным применение большинства физико-химических методов исследования, исключение составляет метод спектроскопии рентгеновского поглощения. Применение данного метода позволяет получать информацию о химическом строении, фазовом составе и морфологии синтезированных или отработанных катализаторов, которая необходима в дальнейшем при совершенствовании методики синтеза катализаторов, создании новых катализаторов и установлении причин их дезактивации.

Наиболее исследованными катализаторами являются катализаторы на основе благородных металлов (Pd, Pt, Rh, Ru, и т. д.) и металлов группы Ib Периодической системы элементов (Cu, Ag, Au), нанесенных на какой-либо оксидный носитель (оксиды алюминия, кремния, церия и т.д.). Как правило, металлы наносятся на поверхность носителя в виде наночастиц или отдельных кластеров, что позволяет в значительной степени снизить стоимость катализатора. Исследование данных катализаторов с помощью спектроскопии рентгеновского поглощения позволяет установить то, как активная фаза взаимодействует с носителем, наличие дефектов в структуре, особенности морфологии частиц (их размера, формы и химического строения). Полученные знания будут использованы для разработки научных основ управляемого синтеза высокоэффективных катализаторов.

Также важно отметить, что в настоящее время наблюдается повышенный интерес к созданию биметаллических катализаторов на основе благородных и переходных металлов. Добавление второго металла к монометаллическим системам позволяет изменять структуру и каталитические свойства нанесенных биметаллических частиц. Такие катализаторы имеют большой потенциал для использования в различных каталитических процессах: переработка нефти, природного газа и газового конденсата в ценные химические продукты, синтез полимеров и сложных химических продуктов с заданными свойствами, обезвреживание токсичных техногенных отходов, тонкий органический синтез. Однако создание подобных катализаторов представляет сложную научную задачу, решение которой во многом зависит от информации, получаемой с помощью метода спектроскопии рентгеновского поглощения.

Задача 1.2. In situ исследование генезиса формирования и стабильности активных компонент промышленно-важных катализаторов

Как правило, синтез катализаторов протекает в несколько стадий, в процессе которых образуются промежуточные соединения, в дальнейшем претерпевающие химические, фазовые и структурные превращения. Исследование подобных превращений промежуточных соединений необходимо для понимания процессов формирования активного компонента катализаторов. Возможности станции «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» позволят изучать генезис формирования активного компонента в различных термодинамических (варьирование температуры и давления) и химических условиях (восстановительная и окислительная атмосфера). Высокое временно́е разрешение позволит исследовать процессы формирования активного компонента катализатора при протекании самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, разложения сложных оксидов. Зачастую активный компонент катализатора формируется непосредственно в ходе протекания каталитической реакции. Например, катализаторы для процессов гидрирования, гидрооксигенации бионефти, нефтепереработки формируются при восстановлении оксидного предшественника непосредственно в реакционных условиях. Для определения химического и фазового состава активного компонента катализатора необходимо проводить исследования в аналогичных термодинамических и химических условиях.

Задача 1.3. Operando исследование функционирования гетерогенных катализаторов

Определение активного компонента катализатора и построение детальных механизмов каталитических реакций имеет определяющее фундаментальное и

прикладное значение. С фундаментальной точки зрения это безусловно способствует развитию катализа и каталитических технологий. С практической точки зрения знание детальной информации о протекании каталитических реакций позволит осуществлять целенаправленный синтез катализаторов, проявляющих максимальную активность и селективность, а также подбирать оптимальные условия протекания каталитического процесса. В связи с этим необходимость проведения *Operando* исследований, дающих сведения о состоянии катализатора непосредственно в условиях реакции, основных интермедиатах реакций и маршрутах протекания каталитических превращений, не вызывает сомнений. В большинстве случаев, такой подход дает более детальную информацию о состоянии катализатора, чем «классический» метод исследования, основанный на *Ex Situ* анализе катализаторов до и после каталитических испытаний. Последние десятилетия данный подход широко используется в мировой научной практике и с каждым годом приобретает все большую популярность.

Operando исследование позволяет изучать как состояние катализатора непосредственно в условиях протекания каталитического процесса, так и интермедиаты реакции, адсорбированные на поверхности катализатора, а также состав реагентов и продуктов в газовой фазе. Для исследования изменения морфологии, химического строения и фазового состава активного компонента катализатора будет применяться спектроскопия рентгеновского поглощения с высоким временным разрешением. Для изучения интермедиатов реакции будет применяться UV-vis- и ИК-спектроскопия, анализ газовой фазы будет осуществляться с помощью метода масс-спектрометрии и газовой хроматографии.

Задача 1.4. In Situ и Operando исследование фотокатализаторов для получения водорода и восстановления CO_2

Стремительное сокращение запасов природного углеводородного сырья определяет острую необходимость поиска и освоения новых альтернативных источников энергии и ресурсов для синтеза ценных органических соединений. Наиболее перспективными являются фотокатализаторы получения водорода из водных растворов доноров электронов (вода, спирты, растворы фосфорорганических соединений). Ключевой задачей здесь является разработка фотокатализаторов, эффективно работающих под действием видимого (солнечного) света. Наиболее перспективными являются композитные фотокатализаторы на основе $Cd_{1-x}Zn_xS$, $Cd_{1-x}Zn_xS/Zn(OH)_2$ или TiO_2, модифицированные наночастицами благородных или переходных металлов. Также перспективным способом использования солнечной энергии является ее прямое преобразование в энергию химических связей с помощью фотокатализаторов. Наиболее

интересным процессом является фотокаталитическое восстановление CO_2, имитирующее, по сути, функцию природного фотосинтеза растений. Химическое связывание CO_2 является актуальной проблемой не только с точки зрения его использования в качестве источника углерода, но и для уменьшения его концентрации в атмосфере. Для восстановления CO_2 в мягких условиях используются аналогичные катализаторы, что и для получения водорода. *In Situ* и *Operando* XAFS-исследования будут проводиться на стадиях синтеза катализаторов, а также в процессе их функционирования. Данные об изменение морфологии, химического состояния, фазового состава исследуемых фотокатализаторов позволят ответить на вопросы об активации и дезактивации фотокатализатора, формировании активных компонент фотокатализатора, а также сформулировать рекомендации по улучшению каталитических свойств исследуемых фотокатализаторов.

Блок задач 2. Функциональные материалы (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, МГУ, ТГТУ, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Задача 2.1. Исследование аккумуляторов и топливных элементов.

Разработка нового типа ионных аккумуляторов высокой емкости на основе лития, натрия и 3d-переходных металлов для гибридных и полностью электрических автомобилей в настоящее время является одной из наиболее важных научных задач. Дополнительно емкость данного типа аккумуляторов не должна значительно снижаться после большого количества циклов разряд-заряд, также они должны характеризоваться высокой скоростью заряда, низкой стоимостью, простотой изготовления и безопасностью. Достижение вышеуказанных характеристик требует всестороннего исследования структуры катодных и анодных материалов и электрохимических реакций в объеме аккумулятора с помощью широкого набора физико-химических методов. Наиболее подходящим методом исследования является спектроскопия рентгеновского поглощения, которая позволяет установить электронное строение и структуру локального окружения атомов, входящих в состав материалов анода и катода. Наиболее ценная информация может быть получена при исследовании аккумуляторов непосредственно в процессе заряда и разряда, т.е. в режиме *In Situ*. Спектроскопия рентгеновского поглощения в режиме *In Situ* с использованием широкого пучка рентгеновского излучения и двумерного детектора позволит строить карты распределения элементов в объеме материалов анода и катода, а также определять их степени окисления, изменения фазового состава и коэффициенты диффузии катионов.

Топливные элементы являются наиболее эффективными экологически чистыми системами получения энергии, в которых в качестве топлива используется водород или спирт, а в качестве окислителя – кислород воздуха. В настоящее время разработано несколько типов топливных элементов, на основе протон-обменных мембран с использованием полимерных электролитов, фосфорной кислоты, твердых кислот, твердых оксидов и многое другое. Однако, как и аккумуляторы, топливные элементы состоят из трех основных компонентов: анод, катод и электролит. По этой причине для исследования данного типа систем применяются аналогичные подходы, что и для исследования аккумуляторов, а именно спектроскопия рентгеновского поглощения в режиме *In Situ* с временны́м и пространственным разрешением.

Задача 2.2. Исследование конструкционных материалов, керамик, защитных покрытий

Данный тип работ будет направлен на решения задач в области создания новых функциональных материалов для авиационной, космической, автомобильной, ядерной и оборонной промышленности. Будут проведены исследования с целью получения необходимых структурных данных, что позволит в дальнейшем изготавливать подобные материалы с заданными свойствами. Проведение *In Situ* XAFS-исследований при высоких давлениях и температурах, позволит установить области стабильности исследуемых материалов и сформулировать рекомендации по улучшению их характеристик.

Задача 2.3. Исследование магнитных материалов

Данный тип работ будет направлен на решения задач в области создания новых функциональных материалов для магнитноэлектроники и спинтроники. В оксидах переходных металлов смешанной валентности – шпинелевые ферриты, перовскиты марганца, двойные перовскиты, купраты, кобальтиты, иридаты и т. д. – представляется богатое разнообразие кристаллографических, электронных и магнитных фаз. Для таких систем наблюдаются уникальные эффекты, такие как фазовый переход Верви, колоссальное магнитосопротивление или высокотемпературная сверхпроводимость. Спектроскопия рентгеновского поглощения и спектроскопия магнитного дихроизма являются идеальными инструментами для одновременного исследования их структурных и магнитных свойств за счет элемент-селективности, высокой чувствительности к валентному состоянию ионов переходных металлов и пространственному разрешению.

Блок задач 3. Нанотехнологии (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, МГУ, ТГТУ, НГУ)

Задача 3.1. Исследование металлорганических каркасных структур.

В последнее десятилетие металлоорганические каркасные соединения (МОКС, также известные как координационные полимеры), представляющие новый класс пористых материалов, привлекают большое внимание исследователей во всем мире. Решетка МОКС состоит из ионов металлов или металлических кластеров, связанных между собой органическими лигандами. В отличие от цеолитов МОКС обладают большим разнообразием состава, а также формы и размера пор. Согласно недавней классификации, координация неорганического связующего может варьироваться от 3 до 66. Хотя в настоящее время прикладное использование МОКС не очень велико, очевидно, что новый класс подобных материалов найдет широкое применение в ближайшем будущем. С этой точки зрения, исследование их структурных и электронных свойств является важной научной задачей, решение которой позволит использовать их для разделения газов и их очистки, разделения жидкостей, хранения газов, доставки лекарств, фотокатализаторов, твердотельных ионных проводников и многих других практических применений.

Задача 3.2. Исследование газовых сенсоров на основе наночастиц.

Газовые сенсоры на основе оксидов металлов (SnO_2, ZnO, TiO_2, In_2O_3, CdO и т. д.) являются наиболее распространенными твердотельными устройствами обнаружения газа для бытовых, коммерческих и промышленных применений, которые имеют много преимуществ, таких как низкая стоимость, простота производства и компактные размеры. Основные свойства, такие как чувствительность, селективность, скорость реакции и т.д., определяются локальной и электронной структурой нанесенных оксидных наночастиц, а также их взаимодействием с носителем. Современные требования к чувствительности (меньше м.д.) и селективности требуют разработки новых типов газовых сенсоров, например, допированием оксидов металлов различными элементами. Спектроскопия рентгеновского поглощения в режиме *In Situ* позволит исследовать изменение локальной и электронной структуры атомов, входящих в состав сенсоров, что в свою очередь позволит создавать более эффективные газовые детекторы.

Задача 3.3. Исследование искусственных ферментов на основе атомов или наночастиц

В настоящее время основной проблемой тонкого органического синтеза является проблема создания катализаторов, обладающих схожей активностью, селективностью и молекулярной избирательностью, что и природные ферменты. Одно из решений –

создание искусственных ферментов на основе атома металла или металлических кластеров, окруженных лигандами. Комплексные соединения металлов с определенной структурой лигандного окружения напоминают активные центры ферментов. Лигандная структура определяет селективность по тому или иному типу молекул, а центральный атом или металлический кластер – определяет реакционную способность и селективность по целевому продукту. Другими словами, структура искусственного фермента определяет его каталитические свойства. Так как искусственные ферменты по своей сути являются макромолекулами, т.е. системами, не обладающими дальним порядком, то единственным способом изучения их электронной и локальной структуры является спектроскопия рентгеновского поглощения. Получаемая информация о геометрическом строении, координации атомов и их валентном состоянии наряду с каталитическими свойствами искусственных ферментов позволит определить механизм реакции, а также в дальнейшем синтезировать новые искусственные ферменты с заданными каталитическими свойствами.

Блок задач 4. Науки о жизни и Земле, геология, защита окружающей среды (ИК СО РАН, ИЦИГ СО РАН, ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИГМ СО РАН, ГИ РАН, МГУ, ТГТУ, НГУ)

Задача 4.1. Исследование биологических объектов

В настоящее время спектроскопия рентгеновского поглощения используется также и для решения биологических задач, таких как определение центров связывания металлов в белках; определение локальной структуры и координации металлов в металлопротеинах (таких как гемоглобин); определение степеней окисления металлов в белковых системах; определение локальной структуры металлов в растениях; определение центров связывания металлов в живых организмах; взаимодействие ионов металлов с мертвыми тканями растений; анализ токсичных тяжелых атомов, содержащихся в биологических материалах.

Задача 4.2. Исследование геологических объектов

Исследование состава и структуры геологических образцов необходимо для решения широкого круга задач – от оценки экологической обстановки до повышения эффективности поиска и добычи полезных ископаемых. Спектроскопия рентгеновского поглощения позволяет определить элементный и фазовый состав образцов, а также степени окисления определенных элементов и их локальное окружение, строить карты распределения элементов по образцу. Дополнительно проведение *In Situ* XAFS-исследований при высоких давлениях и температурах, позволит получить новые

фундаментальные знания о процессах, протекающих в земной коре и сделать выводы о формировании планет в Солнечной системе.

Задача 4.3. Исследование материалов для рационального природопользования и защиты окружающей среды

В настоящее время в области рационального природопользования и защиты окружающей среды разрабатываются технологии для безопасного извлечения стратегически важных металлов и их соединений из руд и отходов, переработки отходов предприятий металлургической, химической, горной и машиностроительной индустрии и топливно-энергетического комплекса, включая твердые отходы химических, нефтеперерабатывающих и нефтегазохимических предприятий, деревообрабатывающих, целлюлозно-бумажных производств. Разрабатываются новые эффективные способы утилизации твердых органических отходов, сточных вод и рекультивации свалок, в частности, разработка и синтез активных сорбентов и полимерных связующих для временной консервации свалок с подавлением газовыделения и безопасной переработки накопившихся отходов в оптимальных условиях. Для успешной реализации разрабатываемых технологий необходимы материалы с определенными свойствами (термическая стабильность, высокая прочность, радиационная стабильность, коррозийная стойкость и т.д.), создание подобных материалов невозможно без знаний об их структуре, химическом строении и фазовом составе. Эти данные могут быть получены в результате XAFS-исследований, проведенных на станции «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм». Проведение *In Situ* XAFS-исследований при высоких давлениях и температурах позволит установить области стабильности исследуемых материалов и сформулировать рекомендации по улучшению их характеристик.

Блок задач 5. Пленки и интерфейсы (ИНХ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИФП СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, МГУ, ТГТУ, НГУ)

Задача 5.1. Изучение процессов осаждения и роста диэлектрических, магнитных, полупроводниковых и металлических пленок

Как известно, пленки, выращенные на различных подложках (Si, SiO_2, Ge, Ni и т.д.), различного генезиса представляют собой двумерные системы, свойства которых отличаются от объемных объектов того же химического и фазового состава. Наноструктуры ферромагнетик/полупроводник перспективны для создания элементной базы нового направления в электронике - спиновой электроники. Физико-химические свойства тонких пленок во много определяются морфологией и взаимодействием с

подложкой, по этой причине изучение процесса осаждения и роста пленок является важной научной задачей. Так как пленки представляют собой двумерные объекты толщиной в несколько монослоев, то спектроскопия рентгеновского поглощения является практически единственным способом, позволяющим непосредственно в процессе роста контролировать морфологию, химическое состояние и фазовый состав пленки, исследовать границу раздела пленка-подложка.

Для реализации экспериментальных методов, необходимых для решения исследовательских задач, на станции «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» предполагается организация трех секций: «Спектроскопия рентгеновского поглощения», «Рентгеновская эмиссионная спектроскопия» и «Спектроскопия магнитного дихроизма». Общая схема распределения задач по секциям станции «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» приведена в Таблице 2.1.4.1.

Таблица 2.1.4.1. Распределение задач по секциям станции «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»

Блок	Задача	Секция «Спектроскопия рентгеновского поглощения»	Секция «Рентгеновская эмиссионная спектроскопия»	Секция «Спектроскопия магнитного дихроизма»
Блок 1 «Катализаторы и каталитические технологии»	***1.1***	■	■	
	1.2	■	■	
	1.3	■	■	
	1.4	■	■	
Блок 2 «Функциональные материалы»	***2.1***	■	■	■
	2.2	■	■	■
	2.3	■	■	■
Блок 3 «Нанотехнологии»	***3.1***	■	■	■
	3.2	■	■	■
	3.3	■	■	■
Блок 4 «Науки о жизни и Земле, защита окружающей среды»	***4.1***	■	■	■
	4.2	■	■	■
	4.3	■	■	■
	4.4	■	■	■
Блок 5 «Пленки и интерфейсы»	***5.1***	■	■	■

Принципиальная оптическая схема станции.

1. Секция «Спектроскопия рентгеновского поглощения»

Спектроскопия рентгеновского поглощения в геометрии «на пропускание» – наиболее востребованный и в то же время наиболее простой экспериментальный метод, который будет реализован в данной секции. Метод применим для исследования образцов с высоким содержанием исследуемого элемента (> 1%) и реализуется с помощью трех ионизационных камер, первая из которых служит для измерения интенсивности входного монохроматического пучка I_0, вторая – для измерения интенсивности прошедшего излучения. После нормирования и обработки полученных сигналов рассчитывается коэффициент поглощения, последующий анализ которого дает информацию об электронном и локальном окружении атомов исследуемого элемента. Между второй и третьей камерой помещается стандартный образец сравнения, который необходим для корректной энергетической калибровки полученных сигналов.

Спектроскопия рентгеновского излучения в режиме измерения флуоресценции используется для исследования высокоразбавленных систем с концентрацией исследуемого элемента меньше 1% или для случаев, когда проведение исследования в режиме пропускания не представляется возможным (пленки, покрытия,

полупроводниковые матрицы). Для регистрации спектров поглощения элементов, края поглощения которых лежат в диапазоне 4-12 кэВ, будет использован плоский кремниевый детектор. Для исследования образцов с низкой концентрацией интересующего элемента (< 0.01%) или для диапазона от 12 до 75 кэВ планируется установить 100-элементный германиевый детектор, охлаждаемый до температуры жидкого азота.

2. Секция «Рентгеновская эмиссионная спектроскопия»

Рентгеновская эмиссионная спектроскопия будет реализована на основе двух спектрометров – Иогановский и фон-Хамосовский эмиссионные спектрометры, а также двух позиционно-чувствительных детекторов. Основное их отличие друг от друга в том, что в случае Иогановского спектрометра используются набор сферически изогнутых монокристаллов, в случае фон-Хамосовского спектрометра используется набор цилиндрически изогнутых монокристаллов.

3. Секция «Спектроскопия магнитного дихроизма»

Измерения спектров рентгеновского поглощения в случае спектроскопии магнитного дихроизма аналогично спектроскопии рентгеновского поглощения за некоторым исключением. При реализации данного метода образец помещается в сильное магнитное поле, а рентгеновское излучение с помощью специального поляризатора приобретает левую и правую круговую поляризацию или линейную горизонтальную и вертикальную. Измерение спектров рентгеновского поглощения осуществляется также в режимах пропускания и измерения флуоресценции.

Станция будет оборудована различными типами химических и каталитических реакторов, позволяющих проводить измерения в конфигурациях «на прохождение» и по выходу флуоресценции, для проведения экспериментов в режимах *In Situ* и *Operando*. Одновременно с регистрацией рентгеновских абсорбционных или эмиссионных спектров будет осуществляться запись ИК- и UV-vis спектров адсорбированных на поверхности твёрдого компонента молекул реакционной среды, что позволит устанавливать корреляции между состоянием образца и его физико-химическими свойствами. Для обеспечения функционирования представленных выше секций в режиме с высоким временны́м разрешением Станция будет оборудована специальным быстродействующим монохроматором, который может осуществлять сканирование по энергиям с частотой до 50 Гц, и специальными быстродействующими ионизационными камерами. Это позволит изучать изменения структурных, магнитных и электронных

свойств веществ в динамике в зависимости от времени, температуры, давления и/или состава газовой смеси.

В силу специфики решаемых на станции задач источником излучения должен быть сверхпроводящий вигглер. Поскольку работа всех секций станции требует использования излучения в различных спектральных диапазонах, одновременное проведение экспериментов на всех секциях не представляется возможным.

Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» должна включать в себя блок рентгеновской оптики, расположенный за фронт-эндом в экспериментальном зале и состоящий из коллиматоров, рентгеновских зеркал, монохроматоров и ловушки прямого пучка. На рисунке 2.1.4.1 представлена схема расположения основных компонентов рентгеновской оптики. В таблице 2.1.4.1 представлен перечень основных компонентов рентгеновской оптики, а также указано их функциональное назначение.

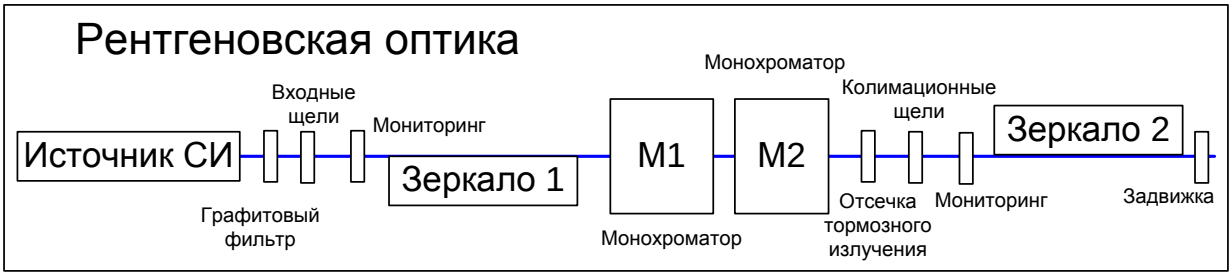

Рисунок 2.1.4.1. Принципиальная схема размещения основных рентгенооптических компонентов станции «XAFS спектроскопия и магнитный дихроизм».

Таблица 2.1.4.1. Описание основных рентгенооптических компонентов станции «XAFS спектроскопия и магнитный дихроизм».

Компоненты	**Функции**
Источник СИ	Вигглер (ондулятор)
Графитовый фильтр	Ограничение/изменение мощности входящего излучения
Входные щели	Задание размера входящего пучка
Мониторинг	Контроль интенсивности излучения
Зеркало 1	Вертикальная коллимация (~20 м) Оптическая длина 1.2 м с тремя отражающими поверхностями – Si, Rh, Pt, ширина каждой 25 мм.
M1	Монохроматизация пучка в режиме быстрого сканирования (высокое временное разрешение)

M2	Монохроматизация пучка. Двухкристальный монохроматор, два типа монокристаллов Si(111) и Si(311), охлаждение жидким азотом, гониометр
Отсечка тормозного излучения	Ловушка прямого пучка
Коллимационные щели	Ограничение рассеянного пучка
Мониторинг	Контроль интенсивности излучения
Зеркало 2	Фокусировка пучка (~26 м) Оптическая длина 1.2 м с двумя отражающими поверхностями – Rh и Pt, ширина каждой 30 мм.
Задвижка	Перекрытие излучения для обеспечения безопасности во время смены образцов и проведения различных технических работ

Оптическая схема – секции станции

На рисунке 2.1.4.2 представлена схема расположения основных узлов станции, используемых для реализации методов спектроскопии рентгеновского поглощения, спектроскопии магнитного дихроизма и рентгеновской эмиссионной спектроскопии. В таблице 2.1.4.2 представлен перечень основных элементов станции, используемых для реализации соответствующих методов.

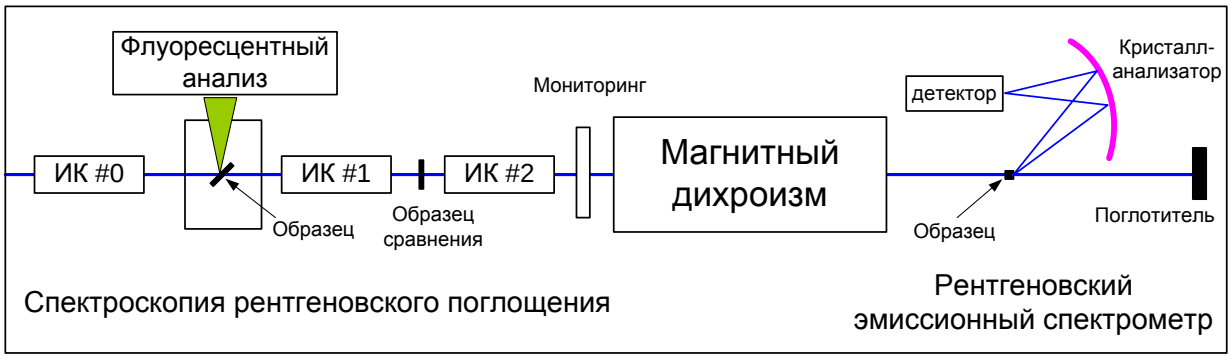

Рисунок 2.1.4.2. Принципиальная оптическая схема реализации методов спектроскопии рентгеновского поглощения, магнитного дихроизма и рентгеновской эмиссионной спектроскопии

Таблица 2.1.4.2. Перечень основных компонентов станции «XAFS спектроскопия и магнитный дихроизм».

XAFS-спектроскопия	
Ионизационные камеры для работы в режиме пропускания	IC Spec FMB Oxford
Флуоресцентный анализ	100 элементный германиевый кристалл высокой чистоты, матрица 10x10 элементов, размер элемента 5x5 мм, плоский кремниевый детектор
Мониторинг	Контроль интенсивности излучения
Рентгеновская эмиссионная спектроскопия	
Коллимационные щели	Ограничение рассеянного пучка
Вон-Хамосовский эмиссионный спектрометр	• Si(111) - 8 кристаллов • Si(110) - 8 кристаллов • Si(311) - 6 кристаллов • Si(400) - 6 кристаллов • Si(331) - 6 кристаллов • Si(422) - 6 кристаллов Кристаллы цилиндрически изогнуты, размер кристаллов 100x40 мм, радиус кривизны - 500 мм.
Детектор	XSpectrum Lambda 750K, модули с кремниевым сенсором толщиной 300 мкм
Иогановский эмиссионный спектрометр	• Si(111) - 6 кристаллов • Si(733) - 1 кристалл • Ge(111) - 1 кристалл • Ge(100) - 1 кристалл • Ge(331) - 1 кристалл • Si(211) - 1 кристалл • Si(531) - 1 кристалл Диаметр кристаллов 100 мм, радиус кривизны - 1000 мм.
Детекторы	• MYTHEN II Позиционно-чувствительный кремниевый детектор, 1280 полос 0.05x8 мм • PILATUS 100K

	2D детектор с размером пикселя 0.172x0.122 мм^2 (разработка в PSI)
Спектроскопия магнитного дихроизма	
Поляризатор	Линейная поляризация Круговая поляризация
Магнит	Поле: ±17 Т Температура: 4-420К СКВИД-магнетометр

Вспомогательная газовая система

Газы – He, N_2, Ar и Kr необходимы для работы и перезаполнения ионизационных камер, вакуумных камер и каналов, смены образца и т.д. Проведение *In Situ/operando* экспериментов требует наличия системы смешения газов в заданной пропорции. Предполагается установка локальных линий, в том числе резервных, которые могут понадобиться для подключения газов при проведении экспериментов сторонними пользователями.

Для решения задач экспериментальной станции «XAFS спектроскопия и магнитный дихроизм» и обеспечения указанных выше режимов работы в качестве устройства генерации излучения может быть использовано одно из следующих устройств:

1. Сверхпроводящий ондулятор типа 1 (см. таблицу 2.3.3). В основном режиме работы диапазон энергий составляет 4,5 – 47 кэВ. Сканирование по энергии осуществляется при помощи изменения тока в катушках ондулятора, т.е. магнитного поля катушек. Время изменения величины магнитного поля для обеспечения перестройки по энергии в диапазоне 1 кэВ для реализации методик быстрой EXAFS-спектроскопии составляет в настоящее время порядка 1 с, соответственно в диапазоне 0,1 кэВ (для быстрой XANES-спектроскопии) – время составляет порядка 0,1 с. Перестройка поля осуществляется синхронно с перестройкой положения кристаллов монохроматоров таким образом, чтобы обеспечить максимум интенсивности излучения на образце. Следует отметить, что в режиме быстрой XANES-спектроскопии можно не перестраивать поле в ондуляторе, настроив максимум используемо гармоники на край поглощения исследуемого химического элемента. Таким образом можно уменьшить время регистрации спектра.

2. Сверхпроводящий вигглер (см. таблицу 2.3.2). В этом режиме устройство генерации СИ излучает непрерывный спектр в диапазоне до порядка 100 кэВ. Однако, имеются существенные ограничения, связанные с использованием такого устройства:

- необходимое энергетическое разрешение метода составляет порядка 10^{-4}, поэтому несмотря на высокий средний поток излучения, количество фотонов в заданном диапазоне в 10 – 100 раз ниже, чем в излучении из ондулятора, что существенно снижает чувствительность метода в случае быстрой XAFS-спектроскопии;

- основной поток излучения в эксперименте является паразитным и приводит к значительному нагреву и, следовательно, деградации рентгенооптических элементов станции.

Указанные соображения будут взвешены и проработаны с учётом параметров излучения из встроенного устройства на этапе технического проектирования, что позволит подготовить наилучший проект экспериментальной станции.

2.1.5. Станция «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

Разрабатываемый проект станции СИ «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» станет базой для передовых научных экспериментов в областях материаловедения, геофизики, археологи, палеонтологии и медицины. На станции будет реализовано ряд исследовательских методик с использованием высокоразрешающей интроскопии, дифракции и рассеяния рентгеновских лучей.

Блок задач 1 Исследование геологических образцов (ИГМ СО РАН, ИНГГ СО РАН, ИНХ СО РАН, НГУ)

Задача 1.1. Исследования трехмерной структуры геологических образцов методом рентгеновской томографии.

Метод Вычислительной рентгеновской томографии (ВРТ) является крайне востребованным для исследования уникальных геологических объектов. ВРТ позволяет во многих случаях оптимизировать геологические исследования при определении минерального (фазового) состава и текстурно-структурных особенностей горных пород и промышленных руд. Привлекательность метода состоит в его недеструктивности, простоте процедуры съемки, отсутствии этапа предварительной подготовки объекта (распиловка, изготовление полированных шлифов, напыление и др.). Так, например, изучение коренных алмазоносных пород с помощью метода ВРТ позволяет определить пространственное распределение породообразующих и акцессорных минералов (в т.ч. алмазов) и охарактеризовать генетические взаимоотношения и последовательность кристаллизации алмазов и сопутствующих минералов в глубинных зонах нашей планеты.

Задача 1.2. Исследования структуры кристаллов методом рентгеновской топографии.

Метод рентгеновской топографии (РТ) позволяет получить данные о дефектах в структуры кристаллов. К нарушениям в строении можно отнести разориентацию и дилатацию (изменение межплоскостного расстояния) решетки, вызванные изменением условий роста кристалла. СИ является уникальным источником для таких исследований по следующим причинам. Высокая интенсивность СИ позволяет реализовать схему трехкристальной топографии, практически невыполнимую при работе с рентгеновскими аппаратами из-за очень длительных экспозиций. Широкий спектр СИ дает возможность учесть условия поглощения и оптимизировать геометрию эксперимента таким образом, чтобы чувствительность РТ к деформации в образце была максимальной. Вследствие низкой расходимости СИ топографические эксперименты проводятся на большом

расстоянии от источника, что дает возможность работать с широким пучком на образце в приближении плоской волны.

Задача 1.3. Исследования геологических образцов при высоких давлениях и температуре

Несмотря на широкое распространение метода создания высокого статического давления с помощью алмазных наковален, он является оптимальным далеко не для всех исследований вещества в экстремальных условиях. Основным ограничением метода алмазных наковален является микроразмер исследуемого образца, объём которого не превышает 0,01 мм^3. Последнее сильно затрудняет или делает невозможными подготовку сложных многофазных образцов, анализ состава и текстуры образцов после эксперимента, а также измерение ряда свойств (например, вязкости расплавов при высоком давлении).

Альтернативной методикой в этом случае является использование «пресса большого объёма», в котором размер образца может достигать кубического сантиметра, что на пять порядков превосходит возможности метода алмазных наковален. Преимуществом таких прессов также является стабильная система резистивного нагрева, позволяющая нагревать образец до 2500°C при минимальных температурных градиентах. Комбинация пресса с полихроматическим пучком синхротронного излучения позволяет как изучать фазовое состояние образца *In Situ* при высоких давлении и температуре методом энергодисперсионной дифракции, так и визуализировать образец в реальном времени методом радиографии, например, для измерения вязкости расплавов методом падающей сферы.

Традиционно значительная часть исследований *In Situ* в прессах большого объёма с использованием синхротронного излучения относится к наукам о Земле, где за последние годы этим методом был получен ряд результатов, опубликованных в изданиях самого высокого уровня: исследована вязкость и особенности накопления магмы на глубинах до 150 км показана возможность транспорта воды из приповерхностных слоёв в нижнюю мантию на глубины более 1200 км, объяснены сейсмические аномалии вокруг погружающихся в мантию литосферных плит и т.д.

Блок задач 2. Исследование уникальных археологических и палеонтологических находок (ИАЭТ СО РАН, ИНГГ СО РАН)

Задача 2.1. Исследования трехмерной структуры уникальных археологических и палеонтологических предметов.

Все методики, реализованные на базе источников синхротронного излучения, предусматривают не разрушающие воздействие на структуру исследуемых образцов.

Поэтому изучение археологических и палеонтологических уникальных находок с использованием СИ является подчас единственным способом получения максимально возможной информации о предметах исследования. Используя методы, развитые на источниках синхротронного излучения можно получать высококачественные изображение в рентгеновском диапазоне где контраст создается не поглощением, а изменением фазы излучения. Фазовые изображения объектов обладают повышенной контрастностью в сравнении с обычными рентгеновскими изображениями позволяют визуализировать детали, отличающиеся по плотности на доли процентов. Наибольшая признание, эти методы получили в палеонтологии. Окаменелости древних животных и растений представляют собой почти монолитные предметы, в которых структура проявляется в мельчайших изменениях составляющих их вещества. Таким образом можно сказать, что новый источник СИ поможет достичь существенного продвижения в исследованиях, связанных с изучением развития древних форм жизни на нашей планете.

Блок задач 3. Создание новых композитных материалов (ИТПМ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, *РФЯЦ ВНИИТФ, РФЯЦ ВНИИЭФ, ИГиЛ СО РАН,* ИХКиГ СО РАН)

Задача 3.1. Исследования трехмерной структуры композитных образцов методом рентгеновской томографии.

Исследование трехмерной структуры композитных энергетических материалов (ЭМ) с помощью РТ позволяет охарактеризовать их свойства на основе данных о распределении плотности неоднородностей в изучаемом объекте. Чувствительность к детонации во многом определяется микроструктурой ЭМ. Так, например, детонационная устойчивость прессованных и литых взрывчатых веществ (ВВ) может различаться на порядок. В настоящее время существуют множество теорий, определяющих качественную зависимость детонационных свойств ЭМ от плотности неоднородностей (имеется в виду количество неоднородностей в единице объема). Однако до сих пор неясно, как и какие неоднородности оказывают на это максимальное влияние. Поэтому для полного понимания таких свойств ЭМ, как устойчивость к детонации и стабильность энерговыделения, необходимо проведение исследований их трехмерной структуры на микронном субмикронном уровне.

Еще одним актуальным примером является исследование микроструктуры композитных материалов, армированных волокнами, включая нанотрубки и полимеры, которые в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные заменители

алюминиевых и титановых сплавов в аэрокосмических приложениях, в первую очередь за счет их высокой прочности и одновременно рекордной легкости.

Задача 3.2. Исследования композитных образцов при высоких давлениях и температуре

Важные результаты с помощью комбинации пресс большого объёма плюс синхротронное излучение получают и в области наук о материалах. Так были подобраны условия для высокобарической ковки жаропрочных авиационных сплавов на основе интерметаллидов алюминия-титана, исследованы фазовые переходы при спекании под давлением, влияющие на свойства магнитных нанокомпозитов Nd-Fe-B и Fe-Zr-B, показана возможность создания новых сегнетомагнитных материалов (мультиферроиков) путём закалки высокобарических перовскитов.

Задача 3.3. Исследования напряжений и механизмов разрушения композитных образцов

Методика фазово-контрастной съемки будет полезна в диагностики напряжений и механизмов разрушения композитных материалов при моделировании наиболее распространенных видов деформаций (изгиб, кручение, сжатие, растяжение) на механических стендах. Одной из задач, которая на протяжении долгого времени стоит перед учеными и практиками, является задача обледенения крыльев и фюзеляжа летательных аппаратов. Ледовые наросты могут менять форму крыльев, приводя к увеличению сопротивления и уменьшению подъемной силы, а также приводить к блокировке подвижных частей крыла, нарушая его функциональность. При этом условия и закономерности роста ледовых наростов до конца неясны. Широкая апертура станции, достигающая на станции до 300 мм и метод фазовых изображений, помогут детально исследовать зарождение наростов и вызываемые ими напряжения в материале крыла, что поможет в борьбе с этим явлением.

Блок задач 4. Биомедицинские и ветеринарные технологии (*ИЦиГ СО РАН, ФИЦ ФТМ СО РАН, НИИПК, НИИТО*).

Задача 4.13. Получение высококонтрастных рентгеновских изображений биологических объектов.

Существует две основных методики, по которым развивается технология получения высококачественных рентгеновских изображений с использованием синхротронного излучения.

Первый метод заключается в использовании рентгеноконтрастных веществ, позволяющих получать изображения с высоким пространственным разрешением и

минимально возможной дозовой нагрузкой на биологические ткани. В качестве контраста используются вещества, содержащие химические элементы с высоким атомным числом, такие как йод, ксенон, гадолиний, висмут и золото. Для получения предельного контраста используется методика разностной радиографии. Суть метода заключается в получении двух изображений в монохроматическом излучении с энергиями рентгеновских фотонов лежащих, до и после К края поглощения исследуемого элемента. Разница этих изображений подчеркивает объекты, содержащие элемент, испытывающий резкий скачок в поглощении при изменении энергии рентгеновских фотонов всего на 100 эВ. Так при использовании препаратов на основе йода можно получать высококачественные изображения кровеносной системы, что является очень важным при диагностики ишемических заболеваний на ранней стадии. Использование небольших концентраций ксенона позволяет визуализировать процессы насыщения легких воздухом на различных стадиях дыхания, что позволяет определять пораженные части легочной системы с высокой точностью.

Другой метод визуализации основан на получение контраста основанного на изменении фазы рентгеновских лучей при прохождении через объект исследования. В секции «фазово-контрастной радиографии» планируется изучать физиологический отклик организма на терапевтическое вмешательство и проводить исследования, связанные с диагностикой заболеваний. Фазовые изображения биологических объектов позволяют визуализировать слабоконтрастные детали в организме, информацию о которых невозможно получить, используя традиционную радиографию. При этом дозовая нагрузка на пациента значительно меньше чем при стандартном радиологическом исследовании, а пространственное разрешение изображений на порядок выше. Такие исследования особенны важны при диагностике злокачественных опухолей на ранней стадии развития, и позволяют контролировать ход развития патологии в течении процесса лечения. Фазово-контрастная радиография очень актуальна при исследованиях приживаемости имплантатов в организме человека. Получаемые изображения позволяют с хорошей точностью диагностировать воспалительные процессы, вызываемые при протезировании суставов или при установки зубных имплантатов.

Таблица 2.1.5.1. Распределение задач по секциям станции «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

Блок	***Задача***	Секция «Рентгеновской микроскопии и томографии»	Секция «Исследования материалов при высоких давлениях и температуре»	Секция «Фазо-контрастной радиографии»
1.Исследование геологических образцов	***1.1***	■	■	■
	1.2	■		
	1.3		■	
2. Исследование уникальных археологических и палеонтологических находок	***2.1***	■		■
3. Создание новых композитных материалов	***3.1***	■		
	3.2		■	
	3.3			■
4. Биомедицинские и ветеринарные технологии	***4.1***	■		■

Режимы работы устройства генерации СИ.

В качестве источника высокоэнергетического излучения планируется использовать сверхпроводящий вигглер, который обеспечит высокий поток излучения на уровне 10^{12}-10^{15} фотон/сек./мм^2 в диапазоне энергий рентгеновских квантов от 10 до 200 кэВ. На канале планируется разместить три экспериментальных установки (секции), которые будут функционировать в последовательном режиме (Рис.2.1.5.1.).

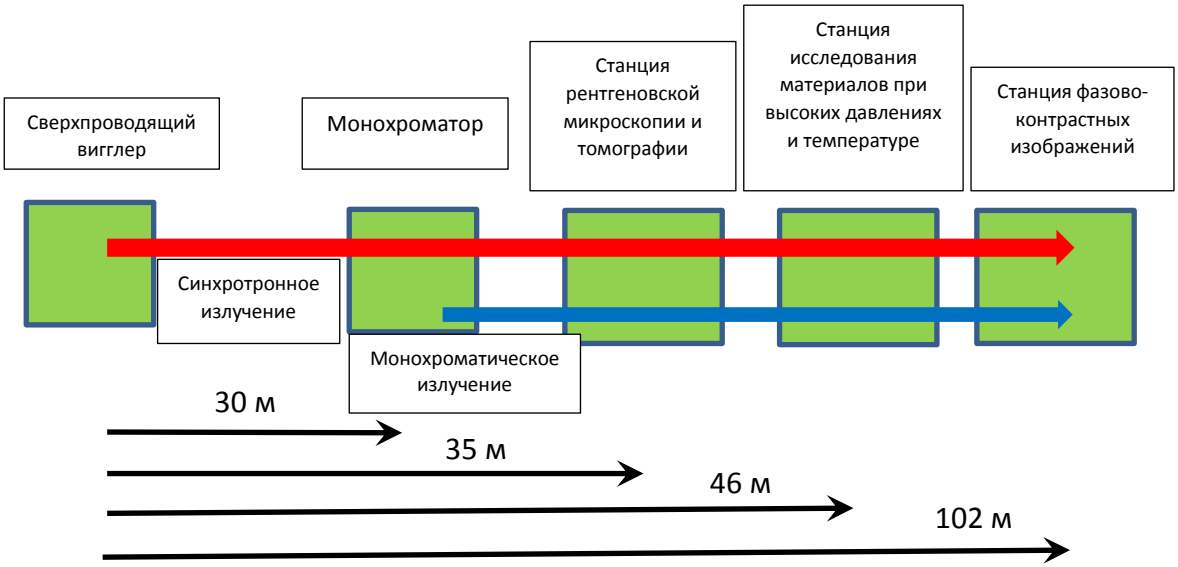

Рисунок 2.1.5.1. Схема канала СИ «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

Ближайшая к источнику секция будет нацелена на исследования, проводимые с использованием рентгеновской микроскопии и томографии с субмикронным пространственным разрешением. Следующая секция предназначена для исследования *In Situ* больших (до 1 $см^3$) объёмов вещества в экстремальных условиях методами энергодисперсионной дифракции и радиографии. В конце канала будет размещена секция, позволяющая получать высококонтрастные изображения в рентгеновском диапазоне для медицинских исследований. Также в этой секции будет реализована возможность получать информацию в реальном времени о изменениях в структуре, которые происходят в индустриальных устройствах, находящихся в нагруженном состоянии.

1. Секция «Рентгеновской микроскопии и томографии».

Секция «Рентгеновской микроскопии и томографии» предназначена для проведения исследований трехмерной структуры не прозрачных образцов с субмикронным пространственным разрешением. Актуальность таких задач наблюдается при исследованиях сложных композитных материалов, горных пород и в производстве высокоиндустриальных изделий (микроэлектроника, высокоточная механика и т.д.).

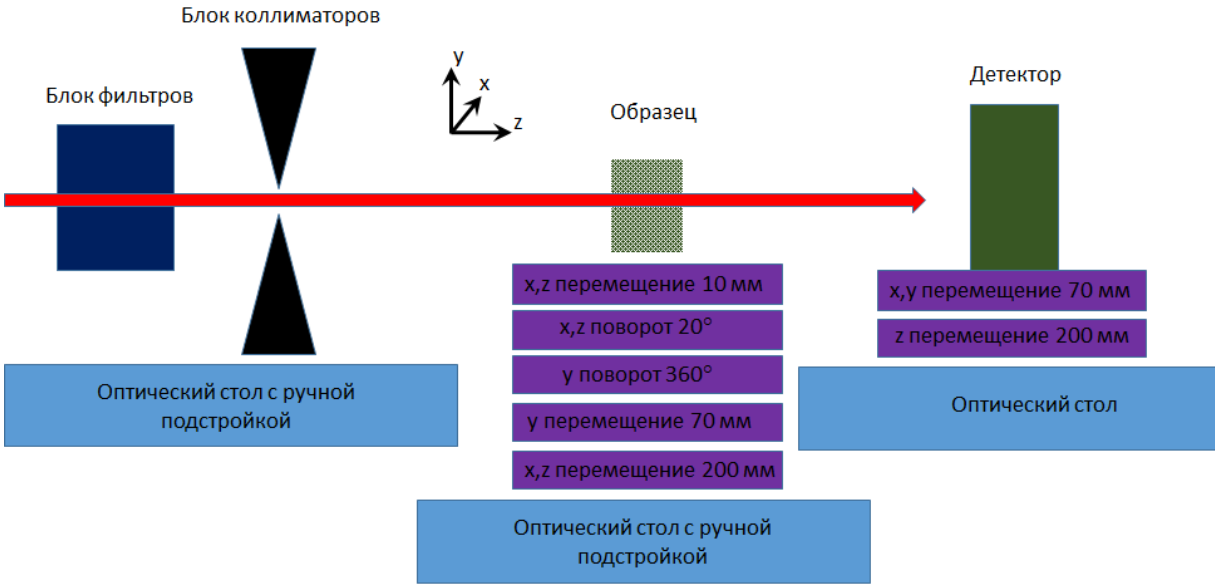

Рисунок 2.1.5.2. Схема секции «Рентгеновской микроскопии и томографии».

На рис. 2.1.5.2 представлено схематичное расположение основных узлов секции «Рентгеновской микроскопии и томографии». Блок фильтров и блок рентгеновских коллиматоров формирует спектральные и геометрические параметры падающего на образец излучения. Образец имеет возможность юстировки относительно пучка по всем направлениям, с точностью перемещения 0,1 мкм и с угловой точностью на уровне 0,001°. В качестве детектора рентгеновского излучения будет использоваться высокоскоростная CMOS-камера со скоростью счета до 1000 кадров/сек и пространственным разрешением на уровне 1 мкм. Камера также имеет юстировку по всем направлениям перемещения, кроме угловых. Поле зрения камеры определятся сопутствующей оптикой и варьируется от 1 до 10 мм в диаметре. Все основные узлы секции располагаются на оптических столах с вибро-подавлением. В исследованиях требующих субмикронного разрешения будет использоваться рентгеновская оптика на базе составных рефракционных линз или техника птихографии, позволяющая восстанавливать изображения из набора интерференционных данных получаемых при сканировании образца относительно пучка, обладающего высокой пространственной когерентностью.

2. Секция «Исследования материалов при высоких давлениях и температуре».

На рис. 2.1.5.3 показана схема основных элементов секции «Исследования материалов при высоких давлениях и температуре». Блок коллиматоров формирует пучок падающего излучения. Пресс обеспечивает давление до 15 МН и обладает возможность юстировки по всем линейным направлениям перемещения в пределах 25

мм, с точностью 3 мкм. Необходимо предусмотреть возможность углового перемещения пресса в диапазоне ± 12° с точностью не хуже 0,01°.

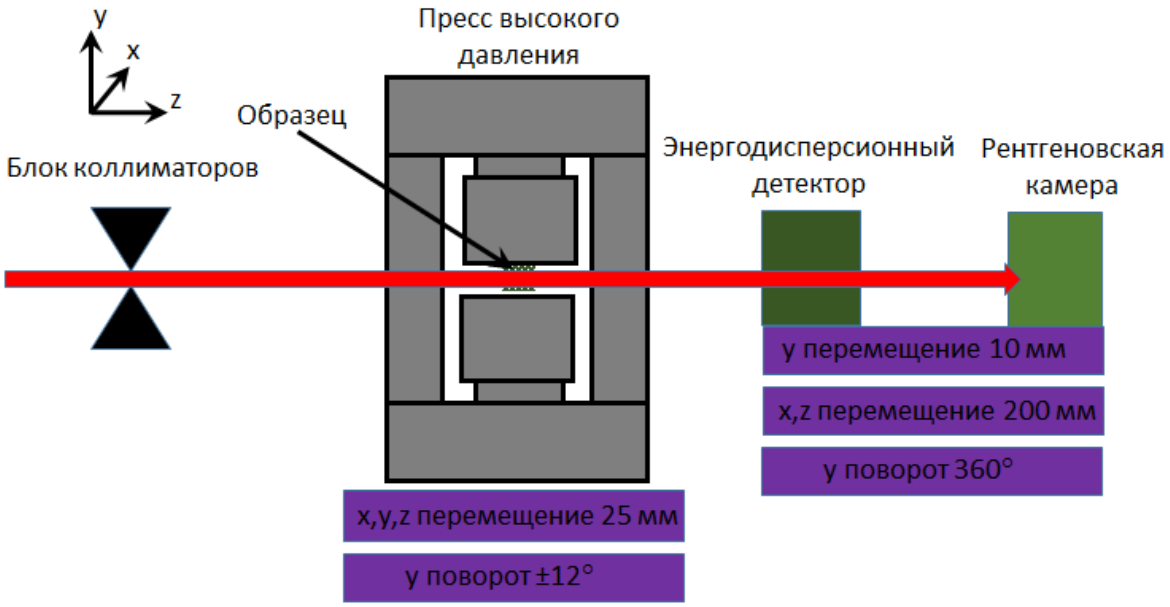

Рисунок 2.1.5.3. Схема секции «Исследования материалов при высоких давлениях и температуре»

Энергодисперсионный германиевый детектор с разрешением $\Delta E/E=10^{-2}$ позволяет получать дифракционные данные при угловом сканировании относительно образца. Перемещение детектора обеспечивается с помощью набора прецизионной механики. секции также оснащена рентгеновской камерой с пространственным разрешением на уровне 5 мкм и скоростью съемки 100 кадров/сек. Камера позволяет контролировать состояние образца и в определенных экспериментах измерять вязкость осуществляя съемку падающей сферы.

3. Секция «Фазово-контрастной радиографии».

Все методики получения фазовых изображений основаны на измерении угла рефракции рентгеновского излучения, возникающей на границе раздела сред в объекте. Для рентгеновского диапазона от 50 до 100 кэВ, значение декремента преломления лежит в пределах 10^{-6}-10^{-7} в зависимости от электронной плотности изучаемого объекта, следовательно, угол рефракции не превышает нескольких микрорадиан. Из-за столь малых углов преломления, для этого диапазона электромагнитных волн необходимо использовать кристалл-анализатор, позволяющий отделить рефракционную компоненту от прошедшего через объект излучение.

Однако не которых случаях при использовании излучения с высокой степенью пространственной когерентности можно применять метод голо-томографии. Метод

заключается в съемке объекта на различных расстояниях, при которых за счет рефракции будут происходит подчеркивание деталей, с размерами соответствующими первой зоне Френеля. Используя этот набор изображений и соответствующий метод математической обработки можно также получать качественные изображения объекта.

На рис. 2.1.5.4 представлено схематическое расположение элементов на секции «Фазово-контрастной радиография».

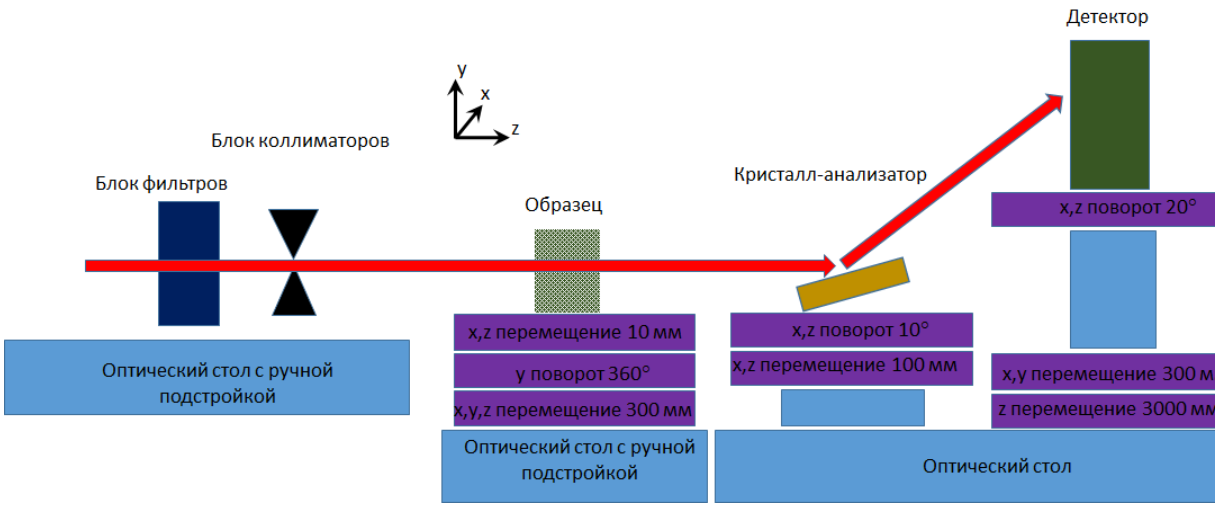

Рисунок 2.1.5.4. Схема секции «Фазово-контрастной радиография»

Образец обладает всеми необходимыми линейные перемещения относительно падающего излучения, которое позволяет получать изображения с размерами до 300 мм. Угловая юстировка кристалл-анализатора осуществляется с точностью не хуже, чем 10^{-5} градуса, которая обеспечивает возможность выбора оптимальной компоненты рефрагирующего на объекте излучения. Рентгеновский детектор, который предполагается использовать на секции должен обладать квантовой эффективностью на уровне не менее 30% в диапазоне энергий рентгеновского излучения от 30 до 150 кэВ и пространственным разрешением не хуже 5 мкм. Для реализации метода голо-томографии детектор будет оснащен линейным перемещением относительно образца на расстояние до 3000 мм с точностью не хуже, чем 0,1 мм.

Принципиальная рентгенооптическая схема станции.

На всех секциях будет предусмотрена возможность работы как с полихроматическим излучением, с использованием рентгеновских фильтров, так и использование монохроматического излучения с полосой пускания на уровне $\Delta E/E=10^{-3}$.

1. Монохроматизация пучка СИ

На станции будет установлен двух-кристальный монохроматор с фиксированным выходом, который обеспечит выбор энергии рентгеновского излучения в диапазоне от 10 до 150 кэВ. В качестве рабочих элементов будет использоваться монокристаллической кремний с различными ориентациями кристаллографических плоскостей в зависимости от рабочего диапазона монохроматического излучения. Для диапазона от 10 до 40 кэВ будут применятся кристаллы кремня с ориентацией (111), для диапазона от 30 до 100 кэВ с ориентацией (113), а для диапазона от 80 до 150 кэВ с ориентацией (115). Рабочая апертура на входе в монохроматор будет составлять 2 мм по вертикали и 50 по горизонтали. Горизонтальное смещение монохроматического излучение относительно падающего из вигглера будет равно 60 мм. Первый кристалл будет иметь вертикальную подстройку, с точностью не хуже 0.1 мкм и угловую в сагиттальной плоскости с точностью 10^{-4} градуса. Второй кристалл будет обладать возможностью перемещение в горизонтальной плоскости, с точностью не хуже 1 мкм и угловой настройкой в сагиттальной плоскости с точностью 10^{-4} градуса и в горизонтальной с точностью порядка 10^{-6} градуса. Для стабилизации температуры первого кристалла будет предусмотрено водяное охлаждение. Для выбора рабочей энергии рентгеновского излучения оба кристалла будут пристраиваться по углу в горизонтальной плоскости от 0° до 20° с точностью 10^{-4} градуса. Все элементы монохроматора будут адаптированы к высокому вакууму (10^{-5} Па). Механизм устройства монохроматора будет иметь возможность пропускания СИ без искажения спектра.

2. Контроль пучков

Для контроля пучков планируется использовать позиционно-чувствительные ионизационные камеры (до и после каждого оптического элемента), а также рентгеночувствительные видеокамеры.

3. Источник СИ

Источником синхротронного излучения на станции будет служить вигглер со сверхпроводящими обмотками (п. 2.3.2). Полная длина вигглера будет 1.7 м, а количество периодов равно 30. Предполагается, что рабочее поле в полюсах магнитов будет достигнуто на уровне 4.5 Тл, тогда суммарная мощность в рентгеновском диапазоне будет составлять около 85 кВт. Критическая энергия СИ из вигглера, разделяющая пополам спектральную мощность на низкоэнергетическую и высокоэнергетическую часть будет равна 26.93 кэВ. Рабочая апертура станции выбрана на уровне 3 мрад, при этом суммарная мощность СИ, приходящая на секции, составляет около 62 кВт.

2.1.6. Станция «Электронная структура»

Станция СИ «Электронная структура» предназначена для исследования электронной структуры на поверхности, в объеме и на границах раздела фаз в кристаллических, поликристаллических, порошкообразных материалах, пленках и многослойных покрытиях твердых тел в широком энергетическом диапазоне первичного излучения (от 50 до 10000 эВ). Станция позволит проводить качественный и количественный анализ состава материалов, химического состояния атомов всех химических элементов, входящих в состав изучаемого материала, характер и направленность химических связей в образце, параметры электронной структуры, включающие дисперсию электронных состояний, заселенность электронных орбиталей в валентной зоне и энергетическую структуру вакантных состояний, ширину запрещенной зоны, атомную структуру поверхностного слоя и локальную атомную структуру, а также энергетическую структуру материалов, обладающих магнитными свойствами, с различным направлением спина в магнитном поле. На станции будут реализованы методы фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (УР-РФЭС), фотоэлектронной дифракции (РФД), фотоэлектронной спектроскопии со спиновым разрешением (СР-РФЭС), рентгеновской спектроскопии поглощения (РСП или XAFS), рентгеновской эмиссионной спектроскопии (РЭС или XES), спектроскопии резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (СРНРР или RIXS). Предлагаемый набор методов обеспечит возможность исследователю использовать наиболее широкий набор методов изучения электронной структуры соединений, включая: состав образцов, проводить неразрушающий анализ распределения элементов по глубине образца от поверхностного слоя до глубин несколько десятков нанометров, и проводить картирование распределения элементов по поверхности, что позволит изучать многослойные гетероструктуры; энергетическое распределение заполненных электронных состояний, зависимость плотности состояний от волнового вектора (зонную структуру), электронную структуру магнитоупорядоченных материалов; энергетическое распределение незаполненных электронных состояний вблизи края рентгеновского поглощения; атомную структуру поверхностного слоя материалов; исследовать локальную атомную структуру атомов, включая элементы 2 - 4 периодов до Zn включительно на K краях поглощения, на L крае от Al до Yb, от Br до U на M поглощения; исследовать вклад различных атомных орбиталей в молекулярные орбитали соединений и изучать химические сдвиги, связанные с перераспределением

электронной плотности в результате химических взаимодействий. Представленный набор методов представляет собой реализацию «экспериментальной квантовой химии», позволяющей в наиболее полной мере исследовать атомную и электронную структуру материалов на одной станции. Предлагаемый проект станции является уникальным и не имеет равных в мировой науке по охвату методов и характеристикам. Концепция линии предусматривает возможность быстрой перестройки энергетического диапазона и выбора метода измерений пользователем станции.

Для исследования влияния характера различных воздействия на атомную и электронную структуру планируется использовать препарационную камеру, включающую возможность нагрева и охлаждения образцов, а также в процессе измерения, напыления контролируемого количества различных металлов на поверхность образца, обработку образцов в различных газовых средах, контроль атмосферы при обработке образцов, проводить чистку поверхностного слоя и исследования профили концентрации элементов методом послойного травления для исследования многослойных структур.

Блок задач 1. Исследование и создание новых передовых функциональных материалов (ИНХ СО РАН, ИК СО РАН, ИФП СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Экспериментальные спектроскопические методы исследования электронной и атомной структуры, основанные на применении рентгеновского излучения, являются одними из наиболее широко востребованных в химии, физики, геологии, био- и нанотехнологиях, материаловедении и др. Более 20 Нобелевских премий по физике и химии получены за работы по изучению электронной структуры и разработки экспериментальных рентгеновских методов по ее исследованию. Синхротронное излучение значительно расширило горизонты научного познания благодаря его уникальным свойствам – широкий энергетический диапазон, позволяющий исследовать практически любой химический элемент, и выбирать наиболее оптимальную область для проведения измерений; поляризация излучения, позволяющая изучать пространственное расположение атомов; высокая интенсивность, что позволяет значительно сокращать время измерений и изучать кинетику процессов с недоступным ранее временным разрешением; временная структура синхротронного излучения позволяет изучать химические процессы и динамику электронов возбужденных систем с фемтосекундным разрешением.

Задача 1.1 Исследование и синтез новых передовых материалов

Фундаментальными насущными задачами современной науки и материаловедения являются проектирование материалов с наперед заданными свойствами, а также целенаправленный поиск методов синтеза. Подход, на который опирается современной наука, основан на связи, с одной стороны, строения материалов с их электронной структурой, а с другой стороны, на связи химических, физических свойств с электронным строением. Знание электронной структуры – одно из необходимых условий для планомерных научных исследований новых материалов и технологий, обеспечивающих выполнение плана развития фундаментальных исследований в Российской Федерации, повышения уровня благосостояния населения страны и обеспечивающей ее безопасность.

В качестве примера можно привести исследования, проводимые в ИНХ СО РАН по взаимосвязи структуры и электрофизических параметров для новых функциональных термоэлектрических материалов на примере твердых растворов сульфидов лантаноидов, исследование электронной и локальной структуры органометаллических соединений, интеркалированных в фторграфитную матриц, исследование локальной структуры аморфных полихалькогенидов переходных металлов, их литиевых и натриевых интеркалятов, кластеров гостей новых гибридных интеркаляционных соединений на основе металлоорганических мезопористых полимеров. Другим примером являются исследования новых магнитных функциональных материалов в виде монокристаллов, поликристаллов и наноматериалов в ИФ СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН, г.Красноярск). Весь комплекс измерений на станции «Электронная структура» широко применяется для исследования подобных материалов, но особенно уникален метод РФЭС со спиновым разрешением.

Особый интерес представляет использование наноматериалов, когда при переходе от массивного твердого тела к размерам 10 нм и менее малые частицы проявляют новые или существенно модифицированные свойства: изменяются параметры кристаллической решетки, электронное строение, магнитные, оптические и каталитические свойства, морфология поверхности. Результаты изучения изменения химических свойств материалов при переходе в наноразмерную область, а также их корреляций с соответствующими физическими параметрами могут быть эффективно использованы на практике при создании новых функциональных материалов.

Основными задачами исследования являются изучение структуры материалов, характера взаимодействия между молекулами или атомами металлов с углеродной матрицей в зависимости от ее состава. В качестве примера можно привести синтез и исследование свойств и строения систем, содержащих кластеры металлов, наночастицы,

исследование атомного упорядочения в наносплавах, процессы формирования наночастиц в процессе термического разложения координационных соединений или из растворов, каталитические реакции на новых нанокомпозитных материалах, в том числе и исследование локальной структуры наночастиц и исследование взаимодействия между атомами наночастиц и материалов подложки, например, исследование локальной структуры монослоев дисульфида молибдена, кадмия, нанесенных на углеродные наноматериалы.

Особое внимание исследователей привлекают возможность получения новых материалов на основе углеродных наноматериалов таких как, фуллерены, нанотрубки и графен. В настоящее время разрабатываются материалы для применения в энергетике, электронике, катализе, фотонике, сенсорике, экологии, медицине и биологии и др. Одним из наиболее перспективных методов улучшения характеристик углеродных наноматериалов является химическая модификация графена и использование композитных материалов на основе графена.

Основным способом анализа новых передовых материалов являются структурные и спектроскопические методы. На синхротронной линии «Электронная структура» будут реализованы три основные спектроскопических метода РФЭС, РСП, РЭС, СРНРР и родственные им методики, УР-РФЭС, СР-РФЭС, фотоэлектронная дифракция (ФЭД), на базе двух спектрометров - РФЭС и РЭС.

РФЭС является одним из широко используемых методов исследования электронной структуры поверхности широкого класса соединений от металлов, полупроводников, изоляторов и сверхпроводников до композитных материалов на основе углерода, таких как органические полупроводники. Определяемыми характеристиками поверхностного слоя толщиной 10-25 Å являются состав, химическое состояния атомов всех элементов, входящих в состав образца, валентная зона, распределение элементов по поверхности (2D-картирование) с пространственным разрешением порядка 10 мкм и глубине (3D-картирование неразрушающим и разрушающими методами).

РФЭС с угловым разрешением (УР-РФЭС) исследует зонную структуру кристаллов, т.е. зависимость энергетического распределения валентных электронов от импульса в кристалле, вследствие сохранения тангенциальной составляющей момента электрона. В УР-РФЭС эксперименте регистрирует энергетического распределения валентных фотоэлектронов в зависимости от направления вылета фотоэлектронов в диапазоне углов 60º с угловым разрешением 0.1º и энергетическим разрешением несколько мэВ.

Фотоэлектронная дифракция (ФЭД) даёт информацию об атомной структуре поверхностных слоев. В эксперименте по ФЭД регистрируются угловые зависимости интенсивности фотоэлектронов внутренних уровней с вращением образца в азимутальной плоскости. В процессе фотоионизации эмитируемые фотоэлектроны внутренних уровней рассеиваются на потенциале соседних атомах, в результате интерференции падающей и рассеянной волны образуется дифракционная картина. В результате анализа углового распределения интенсивности фотоэлектронов появляется возможность определять позицию атома и его окружения. Сопоставляя дифракционные картины для различных атомов можно восстановить структуру поверхностного слоя. Изменяя энергию падающего излучения можно исследовать структуры на различной глубине. На основе фотоэлектронной дифракции возможно получение трехмерной картины распределения атомов, т.е. фотоэлектронной голографии.

Тонкая структура рентгеновских спектров поглощения (РСП) является элементно-селективным локальным методом для изучения электронной (степень окисления) и локальной атомной структуры соединений в различных агрегатных состояниях: кристаллы, стекла и аморфные соединения, молекулярные и композитных материалов.

При изменении энергии падающего излучения с переходом через край рентгеновского поглощения, происходит процесс поглощения, в результате которого электроны с внутреннего атомного уровня переходят на внешний незаполненный уровень атома, или в непрерывную область значений энергии. Процесс распада этого возбужденного состояния сопровождается эмиссией электронов и рентгеновской флуоресценцией. Установив детекторы вторичных электронов и флуоресценции, будут измерены спектры рентгеновского поглощения ближайшей тонкой структуры (БТС РСП). Спектры БТС РСП обеспечивают информацию о незанятых электронных уровнях интересующего атома и геометрию его ближайшего окружения и являются чрезвычайно характеристичными («отпечатки пальцев») для анализа характера химической связи и степени окисления атома. Изменяя метод регистрации (Оже-электроны, полный и частичный выход электронов) может быть получена информация об электронной структуре данного атома с различной глубины, начиная с поверхностного слоя.

В результате интерференции первичной и отраженной на соседних атомах фотоэлектронных волн в спектре поглощения наблюдаются флуктуации, т.е. дальняя тонкая структура рентгеновского поглощения (ДТС РСП). Анализ ДТС РСП спектров позволяет получать информацию о локальной атомной структуре выбранного атома, а именно, межатомные расстояния до нескольких ближайших сфер, координационные

числа, статистическую и динамическую разупорядоченность, а также типе атомов ближайший координационных сфер.

На базе рентгеновского эмиссионного спектрометра будут доступны уникальные для изучения электронной структуры и химической связи методики, такие как рентгеновская эмиссионная спектроскопия (РЭС), спектроскопия резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (СРНРР). Энергии переходов, связанные с внутренними уровнями, уникальны для каждого атома, а химические сдвиги обеспечивают информацию о зарядовом состоянии атомов в образце. Энергия переходов не зависит от проводимости образцов. Интенсивность спектров рентгеновской эмиссии, связанных с электронными переходами с валентной полосы на внутренний уровень, определяется дипольными правилами отбора, что дает возможность напрямую определять конфигурацию занятых электронных орбиталей атомов, участвующих в химической связи и их взаимное положение в валентной зоне. Поляризационный характер интенсивности рентгеновской эмиссии дает информацию о типе химических связей и их ориентации в пространстве. РЭС дает сведения об энергетическом распределении плотности состояний валентных электронов данного выбранного атома, позволяет выявить симметрию их волновых функций и их распределение между сильно связанными локализованными электронами атома и коллективизированными электронами твёрдого тела.

Резонансное неупругое рентгеновское рассеяние - это двухступенчатый процесс, включающий в себя поглощение падающих рентгеновских фотонов и рентгеновскую эмиссию. При возбуждении внутреннего электрона в зону проводимости возникает рентгеновская эмиссия, отвечающая переходам из валентной зоны электронов с тем же самым волновым вектором. Спектры СРНРР отображают дисперсию электронов валентной зоны и зоны проводимости. Методику измерений СРНРР можно рассматривать как двухэтапный процесс. Исходя из начального состояния, поглощение падающего фотона приводит к созданию возбужденного промежуточного состояния с появлением «дырки» на внутреннем энергетическом уровне. Излучение фотона и релаксация «дырки» приводят к конечным состояниям. Процесс поглощения дает информацию о незанятых электронных состояниях, а эмиссия дает информацию о занятых состояниях электронов. В эксперименте СРНРР эти две части информации объединяются в единую картину (плоскость СРНРР).

Таким образом, на станции «Электронная структура» могут быть реализованы несколько методик, позволяющих полностью описать электронную структуру широко класса объектов.

Задача 1.2. Исследование и создание многослойных структур (ИНХ СО РАН, ИФП СО РАН, ИК СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

Полупроводниковые многослойные структуры, имеют различные перспективные применения при разработке и микроминиатюризации устройств, содержащих нанофункциональные элементы. В последние два десятилетия полупроводниковые гетероструктуры с «квантовыми точками» и «квантовыми ямами» вызывают повышенный интерес во всем мире в связи с их уникальными физическими свойствами и возможностью создания на их основе наноразмерных светоизлучательных приборов, фотоприемников и электрооптических переключателей. Группы туннельно-связанных КТ, упорядоченных в пространстве, считаются наиболее перспективными объектами для создания на их основе приборов нового поколения, работа которых будет основана на законах и принципах квантовой механики. Многослойные наноструктуры полупроводник/ферромагнетик (в частности, полученные в ИФ СО РАН) в настоящее время уже используются для демонстрации возможностей спиновой электроники. Большое значение для микроэлектроники имеет исследование границ раздела тонких пленок многослойных систем на основе оксидов, карбидов и нитридов кремния и высоко-диэлектрических многокомпонентных пленок в зависимости от условий роста. Исследование поверхностных структур на основе соединений графена и низкоразмерных соединений переходных металлов представляет значительный интерес в связи с применением материалов для элементов фотоэлектроники, полевых транзисторов, газовых сенсоров. На основе таких низкоразмерных материалов могут быть спроектированы объемные конструкции, которые представляют большой интерес для создания новых оптических материалов. Биметаллические наночастицы, в том числе и в составе композитных материалов, обладают широким спектром свойств, которые уже нашли свое широкое применение в катализе, оптоэлектронике, медицине и др. областях. Исследование распределения элементов внутри наночастиц занимает одно из центральных мест при изучении их состава и строения, поскольку именно атомное упорядочение в таких системах ответственно за необычные свойства, которыми каждый из объемных металлов в отдельности не обладает.

Применение спектроскопических методов (РФЭС, УР-РФЭС, СР РФЭС, ФЭД, РСП, РЭС, СРНРР) на основе синхротронного излучения имеет важное значение для фундаментальной науки при исследовании строения и электронной структуры наноматериалов. Спектроскопические методы исследования являются уникальными и практически безальтернативными при исследовании особенностей локальной

пространственной структуры наносистем, которые, как правило, не имеют, или имеют ограниченный дальний порядок упорядочения.

Для исследования многослойных гетероструктур и границ разделов слоев необходимо получать информацию с более глубоких слоев. Методика РФЭС с возбуждением жестким рентгеновским излучением (ЖР РФЭС) дает возможность проводить неразрушающий анализ объемных слоев (до 200 Å) при изменении энергий возбуждения в широком рентгеновском диапазоне (до 10000 эВ). Энергетический диапазон от мягкой (50-2000 эВ) до жесткой (2000-8000 эВ) области является особенностью данной линии. Использование широкого рентгеновского диапазона позволяет изучать более глубокие уровни в методе РФЭС, что необходимо для исследования распределения элементов по глубине, а также расширяет число исследуемых химических элементов до U в методе рентгеновской спектроскопии поглощения (XAS). Исследование распределение элементов по глубине будет производиться неразрушающим методом анализа РФЭС с угловым разрешением (УР-РФЭС) и варьированием энергии возбуждающего излучения. Разрешение по глубине достигается за счет изменения глубины анализа от угла выхода фотоэлектронов внутренних уровней при вращении образца, а также за счет зависимости длины пробега электронов от энергии падающего излучения. Дополнительно к профилю распределения элементов и химического состояния атомов по глубине неразрушающим методом, появляется возможность определять толщину тонких пленок, упорядочение слоев в ультратонких пленках. Сочетание ЖР РФЭС и УР-РФЭС делает возможным анализ практических наноустройств, тонких пленок, интерфейсов многослойных структур, наночастиц, чья толщина составляет несколько десятков нанометров. Данный этап развития метода ЖР РФЭС позволяет проводить *in situ* исследования твердотельных процессов формирования многокомпонентных металлических частиц, наносплавов, образующихся в результате термического разложения предшественников, как правило, содержащих все металлы в своем составе.

Из-за низких сечений фотоионизации при высоких энергиях возбуждения, особые требования предъявляются к детектирующей системе электронов, чтобы получить высокое разрешение (низкий темновой ток, линейный отклик и широкий динамический диапазон, высокое рабочее напряжение). Высокое энергетическое разрешение является одним из основных приоритетов станции. Энергетическое разрешение предполагается будет не хуже 10 и 100 мэВ для РФЭС и HAXPES, соответственно.

Задача 1.3. Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику (ИНХ СО РАН, ИК СО РАН)

Поиск альтернативных источников энергии является актуальной глобальной проблемой в условиях истощения природных запасов нефти и газа, загрязнения окружающей среды, глобального изменения климата. Одним из основных антропогенных факторов, влияющих на изменение климата, является выброс в атмосферу промышленными предприятиями. Поиск систем эффективного, экологичного и безопасного накопления химической энергии является ключевым фактором развития альтернативной энергетики на возобновляемой ресурсной базе. Электричество, генерируемое при сжигании новых видов экологического топлива, так же требует новых высокоэффективных систем хранения, таких как аккумуляторы и суперконденсаторы, для сглаживания суточных колебаний потребления.

Альтернативные источники энергии на сегодняшний день одно из наиболее актуальных и активно развивающихся направлений в мире, что обусловлено истощением природных запасов нефти и газа, загрязнением окружающей среды, изменением климатических условий на планете. Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) являются представителями возобновляемых и контролируемых источников производства и хранения энергии. Рост глобального рынка ЛИА связан с производством устройств портативной электроники, стационарных источников энергии, а также электромобилей. вопросы устойчивой и безопасной работы приобретают большое актуальное значение. Исследование механизмов деградации в ЛИА с конкретной конструкцией составом материалов имеет решающее значение для снижения рисков негативного воздействия деградации в ЛИА. Одним из важных путей увеличения сроков жизни ЛИА является поиск новых материалов, в особенности наноматериалов. На современном уровне научного и технического развития исследование процессов деградации в ЛИА на основе наноматериалов, создание новых материалов для возобновляемых источников энергии, как и поиск принципиально новых источников энергии являются вызовом, требующим привлечения различных современных физико-химических методов анализа атомной структуры, электронного строения, морфологии материалов с привлечением современных источниках синхротронного излучения.

Огромный потенциал для развития инновационных технологий хранения энергии заключен в наноструктурированных пористых материалах с высокой внутренней удельной поверхностью. Поэтому нанокомпозитные материалы являются основным классом материалов, активно исследуемых в данный момент для применения в качестве электродов в солнечных элементах, аккумуляторных батареях, суперконденсаторах. Это связано с тем, что однокомпонентные материалы не могут обеспечить достаточные характеристики, такие как удельная ёмкость, потеря ёмкости при заряде-разряде, а также

уменьшение ёмкости при повышении тока заряда-разряда. Большой интерес в настоящее время вызывает структура интерфейсных слоев в суперконденсаторах и ионных электрохимических элементах и исследование процессов, происходящих в батареях и суперконденсаторах, на поверхности и границе между компонентами электродного материала или электрода и электролита. Дальнейший прогресс в области рационального дизайна материалов хранения энергии нового поколения ограничен недостаточно полным знанием атомистических механизмов и факторов, влияющих на формирование таких взаимодействий.

Рентгеновские методы анализа, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и спектроскопия поглощения вблизи края поглощения (РСП), активно используются для исследования в этой области, поскольку позволяют характеризовать химические состояния атомов вещества, в том числе и на поверхности, при этом возможности синхротронных источников излучения существенно превосходят возможности лабораторных приборов в части разрешения и скорости проведения экспериментов.

Задача 1.4. Исследование магнетизма (ИНХ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

В настоящие время в ряде лабораторий ИНХ СО РАН ведется синтез и изучение свойств соединений переходных и редкоземельных металлов с переменной валентностью, которые рассматриваются в качестве функциональных материалов. Большой интерес представляют полученные в ИФ СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск) магнитные материалы с диэлектрической поляризацией (мультиферроики), кристаллы с пониженной размерностью магнитной и электронной подсистем, монокристаллы с внутренним беспорядком в распределении различных катионов по неэквивалентным кристаллографическим позициям.

Исследование электронной структуры имеет существенное значение при изучении магнитных свойств материалов молекулярной электроники - комплексные, кластерные, супрамолекулярные соединения, биологические молекулы (в т.ч. ДНК), содержащие несколько типов магнитных центров; магнитные и термоэлектрические материалы: многокомпонентные сплавы переходных элементов, сложные твердые растворы неорганических соединений. наноструктурированые материалы спинтроники: тонкопленочные структуры, квантовые точки, квантовые провода и др., содержащие атомы-носители магнитного момента. Подобные соединения, могут быть использованы как материалы для элементов электронной памяти.

Магнитные свойства образцов измеряются методом РФЭС со спиновым разрешением (СР-РФЭС). В СР-РФЭС эксперименте к фотоэлектронам, прошедшим

через выходную щель энергоанализатора прикладывается магнитное поле разной направленности, и рассеянные электроны регистрируются многоканальным спиновым детектором. В результате будет получена информация об энергетическом распределении электронов с противоположным спином, что представляет большую ценность для исследования электронной структуры магнитоупорядоченных материалов.

Задача 1.5. Исследование биологически активных веществ, в том числе белков, в пористых сорбционных матрицах (ИК СО РАН, ИХБФМ СО РАН)

Количественный элементный анализ методом РФЭС позволяет исходя из стехиометрии идентифицировать как отдельно выделенные аминокислоты, так и белки известного состава. Это позволит применить метод для изучения процессов выделения биологически важных веществ белковой и небелковой природы на поверхность пористых матриксов, выступающих в роли сорбционных депо для обеспечения пролонгированного воздействия. С использованием мягкого ионно-кластерного травления возможно определение профиля концентрации целевого вещества в глубине матрицы.

Блок задач 2. Метрология и рефлектометрия (ИЯФ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, ИПГ им. Е.К.Федорова, ФИ РАН им. П.Н.Лебедева, ИФМ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ГОИ им. С.И.Вавилова, ВНИИА им. Н.Л.Духова, РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ)

Для разработки и реализации метрологических методик в широком рентгеновском диапазоне (30–6 000 эВ) необходимо метрологическое обеспечение работ, использующих мягкое рентгеновское излучение. Спектральная метрология на больших образцах включает аттестацию и калибровку отражающих решеток, разработку и технологическое тестирование оптических элементов; измерение отражательной способности, эффективности, пропускания, дифракцию как функция угла падения / азимутального угла или энергии фотонов; характеризацию оптических поверхностей; тип рассеяния; шероховатость поверхности и энергетическое разрешение.

Предполагается выполнение работ в интересах широкого круга исследовательских организаций, высших учебных заведений и промышленных предприятий в рамках таких приоритетных направлений научных исследований, как индустрия наносистем и материалы, энергоэффективность и энергосбережение.

Отрасли науки и технологии, в которых будут востребованы результаты работы станции:

- Физика плазмы. Высокотемпературная термоядерная плазма имеет максимум излучения именно в МР и ВУФ диапазонах, причем в этой области лежит не только максимум излучения плазмы как абсолютно черного тела, но и основные, наиболее информативные характеристические линии многократно ионизованных химических элементов. Для регистрации, перенаправления, фокусировки и разложения в спектр этого излучения необходим весь перечень объектов калибровки, перечисленных в вышеприведенной таблице. В частности, при создании метрологической базы для установки класса «мегасайенс» УФЛ-2М, создаваемой в РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров) в настоящее время существует острая потребность в разработке и аттестации низкочувствительных быстродействующих детекторов. Хорошими кандидатами на эту роль являются коаксиальные алмазные детекторы типа ЭТДРИ, разрабатываемые ВНИИА им. Духова. Низкая чувствительность и малое время отклика этих детекторов создают существенные сложности для их временной и спектральной калибровки, и эта задача может быть качественно решена только с использованием мощного источника синхротронного излучения.
- Астрофизические исследования с использованием аппаратуры космического базирования. Электромагнитное излучение МР и ВУФ диапазонов несет наиболее важную и подробную информацию для исследования процессов, протекающих не только на Солнце, но и на других наблюдаемых звездах. Кроме того, наблюдение активности Солнца на линии Лайман-α водорода (121.5 нм) дает важную информацию, необходимую для предсказания и анализа "космической погоды", которая оказывает сильное влияние на многие аспекты человеческой деятельности. Сложность наблюдения заключается в том, что излучение этого диапазона не проходит сквозь земную атмосферу и появляется необходимость выносить рабочие инструменты (спектрометры, телескопы, радиометры, коронографы и другое оборудование) на космические аппараты. Этот факт заставляет придавать метрологическому обеспечению всей перечисленной аппаратуры особое значение. Тщательная и надежная калибровка такого оборудования в настоящее время является обязательным требованием при его предполетной подготовке.
- ЭУФ нанолитография. Это направление считается одним из наиболее перспективных для дальнейшего развития наноэлектроники и наномеханики следующих поколений. Развитие этого направления требует метрологической поддержки для создания оптических элементов как важнейшей части

нанолитографических установок, формирующей изображение наноструктур на рабочей подложке. Требуется измерение абсолютных коэффициентов отражения, аттестация шероховатости используемых поверхностей, качества их фокусирующих свойств.

Задача 2.1 Аттестация спектральных оптических элементов

Будут измерены следующие спектральные характеристики для дифракционных решеток, многослойных зеркал, кристаллов-анализаторов: спектральное разрешение, пиковый и интегральный коэффициенты отражения, однородность характеристик по поверхности. Для зеркал полного внешнего отражения измеряется спектральный коэффициент отражения, однородность характеристик по поверхности. Для пленочных рентгеновских фильтров будут измерены спектральный коэффициент пропускания, однородность характеристик по поверхности и наличие проколов.

Задача 2.2. Аттестация фокусирующих элементов

Для фокусирующих оптических элементов, включающие вогнутые зеркала, рефракционные линзы и капиллярную оптику, будут измеряться размер фокусного пятна,

эффективность пропускания, коэффициент усиления яркости.

Задача 2.3. Аттестация детекторов рентгеновского излучения

Перечень калибруемых детекторов рентгеновского излучения включает в себя сцинтилляционные счетчики, полупроводниковые детекторы, вторично-электронные умножители, ионизационные камеры (газовые и твердотельные), лавинные детекторы, болометры и радиометры. Станция позволит измерять следующие характеристики: спектральная чувствительность, насыщение детектора при больших загрузках, линейность отклика детектора, однородность чувствительности по поверхности, предел обнаружения, радиационная стойкость, временные характеристики, стабильность характеристик во времени.

Задача 2.4. Поляризационная рефлектометрия

Помимо задач метрологии методами рефлектометрии могут успешно решаться задачи определения свойств тонких пленок и мультислойных структур, а также их интерфейсов (толщина, шероховатость, состав, морфология, и т.д.). При этом использование поляризованного излучения позволяет решать уникальные задачи измерения намагничивания в каждом магнитном слое. (В ряде случаев подобная информация доступна только этому методу).

Блок задач 3. «Выполнение фундаментальных исследований при давлении близком к условиям окружающей среды» (ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, ИФП СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИГМ СО РАН, ИХХТ СО РАН (г. Красноярск), ИХТТМС СО РАН)

Титульный метод, реализованный на экспериментальной установке секции «Фотоэлектронная спектроскопия высокого давления» – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия основан на регистрации и анализе энергетических спектров электронов, испускаемых материалом образца под воздействием сверхмягкого рентгеновского излучения. Это позволяет определить количественный элементный состав объектов исследования, химический состав (степени окисления обнаруженных элементов, идентификация функциональных групп в химических соединениях) и электронные свойства (определение уровня Ферми для проводящих и полупроводниковых материалов и тонкой структуры валентной зоны). Универсальность метода РФЭС в отношении исследуемых образцов в сочетании с большой, постоянно расширяющейся базой данных, делает его не только мощным самостоятельным инструментом химических и физических исследований, но и идеальным дополняющим методом в рамках экспериментов, проводимых на других станциях СКИФ.

Задача 3.1 Исследование каталитически активных материалов при высоком (субатмосферном) давлении

Для выполнения исследований, связанных с разработкой катализаторов и каталитических носителей с улучшенными эксплуатационными характеристиками, для выполнения научно-исследовательских программ ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, ИППУ СО РАН (г. Омск), Института углехимии и химического материаловедения СО РАН (г. Кемерово) и других НИИ и ВУЗов (НГУ, ТПУ, ТГУ) необходимо исследование каталитически активных материалов (катализаторы, носители) различной природы – металлы, в том числе, в нанодисперсной форме, оксиды, соли, углеродные материалы и др.

Будут решаться такие задачи, как

- идентификация адсорбционных состояний реагентов и продуктов промышленно важных каталитических реакций на поверхности модельных катализаторов с целью уточнения механизма и оптимизации каталитических процессов;
- выяснение состава и электронной структуры активных центров металлических катализаторов в реальных условиях проведения окислительно-восстановительных реакций;

- исследование диффузионно-сегрегационных процессов, во многом обуславливающих как активацию, так и дезактивацию биметаллических нанесенных и других многокомпонентных катализаторов;
- разработка катализаторов переработки биомасс для получения инновационных материалов;

Задача 3.2. Создание и исследование инновационных материалов при давлении близком к условиям окружающей среды

Исследование методом РФЭС изменений химического состояния редкоземельных элементов в составе сложных оксидов в ходе термических и окислительно-восстановительных обработок позволит прогнозировать работу энергопреобразующих устройств на их основе и оптимизировать элементный состав функциональных материалов. Потенциальные пользователи – ИК СО РАН, ИНХ СО РАН, ИФП СО РАН, ИХТТМ СО РАН и др. Обработка газовыми смесями различного состава и in situ исследование изменений элементного состава образцов позволит изучать процессы функционализации – введения гетероатомов (азота, галогенов и др.) для изменения эксплуатационных свойств – инновационных углеродных и оксидных материалов в интересах ИНХ СО РАН, ИФП СО РАН, ИК СО РАН, ИППУ СО РАН (г. Омск), Института углехимии и химического материаловедения СО РАН (г. Кемерово).

Задача 3.3. Исследование минерального сырья и других геологических материалов (ИГМ СО РАН, ИХХТ СО РАН (г. Красноярск), ИХТТМС СО РАН)

Методом РФЭС будут проведены исследования химического состава образцов руд (в первую очередь, сульфидных) на разных стадиях их переработки для оптимизации промышленных процессов добычи металлов из трудноизвлекаемого сырья с использованием газовых, термических и криогенных обработок.

Режимы работы устройства генерации СИ

Для реализации методов, необходимых для решения поставленных задач, требуется вставное устройство с возможностью перестройки в энергетическом диапазоне от 30 до 10000 эВ и яркостью порядка ~ 10^{13} фотонов/с при 0.4 А. Это вставное устройство панируется для использования в двух энергетических диапазонах: (1) 30-2800 эВ и (2) 2800- 10000 эВ.

(1) Мягкая область (30-2000 эВ)

Этот энергетический диапазон является основным для всех трех секций (станций) - «Электронной структуры», «Фотоэлектронной спектроскопии высокого давления», «Рефлектометрии». Все эксперименты предполагают сканирование по энергии.

(2) Область энергий (2800-10000 эВ)

Этот энергетический диапазон требуется секции «Электронной структуры» для измерений рентгеновских фотоэлектронных спектров с различной энергией возбуждения и для спектров поглощения. Сканирование по энергии в узком (XANES) и более широком диапазоне (EXAFS).

1. Секция «Электронная структура».

Предназначена для фундаментального и прикладного исследования электронной структуры материалов на поверхности, интерфейсах и в объеме в широком энергетическом диапазоне (50 до 10000 эВ). Объекты – широкий класс объектов от новых материалов с различными функциональными свойствами до биологических и археологических.

В мягкой области (50 – 2000 эВ) будут проводится эксперименты РФЭС, РФЭС с угловым и спиновым разрешениями, фотоэлектронной дифракции, рентгеновской абсорбционной спектроскопии (XAFS), рентгеновской эмиссионной и резонансной эмиссионной спектроскопии.

В жесткой области (2800-10000 эВ) в режиме сканирования по энергии будут измеряться БТС РСП и ДТС РСП спектры. Фиксированные энергии будут использованы для возбуждения РФЭС спектров с различной глубины.

Станция позволит проводить исследования:

- химического состояния атомов всех элементов, входящих в состав материала,
- конфигурацию электронных орбиталей, участвующих в химической связи,
- типа лигандов,
- валентной зоны, 2D/3D-картирование,
- локальную атомную структуру.
- Спектрометр РФЭС с анализатором PHOIBOS 150 HV позволит получать спектры в угловом диапазоне 60˚ (±30˚) с разрешением 0.1º в энергетическом диапазоне до 7 кэВ, с энергетическим разрешением порядка 7 и 15 мэВ для РФЭС и ЖР РФЭС, соответственно.

Таблица 2.1.6.1. Распределение задач по секциям станции «Электронная спектроскопия»

		Секция «Электронная структура»	Секция «Фотоэлектронная спектроскопия высокого давления»	Секция «Рефлектометрия»
Блок 1 «Исследование и создание новых передовых функциональных материалов»	***Задача 1.1***			
	Задача 1.2			
	Задача 1.3			
	Задача 1.4			
	Задача 1.5			
Блок 2 «Метрология и рефлектометрия »	***Задача 2.1***			
	Задача 2.2			
	Задача 2.3			
	Задача 2.4			
Блок 3 «Исследование материалов при высоком (субатмосферном) давлении»	**Задача 3.1**			
	Задача 3.2			
	Задача 3.3			

Спектрометр РФЭС с анализатором PHOIBOS 150 HV позволит получать спектры в угловом диапазоне 60˚ (±30˚) с разрешением 0.1º в энергетическом диапазоне до 7 кэВ, с энергетическим разрешением порядка 7 и 15 мэВ для РФЭС и ЖР РФЭС, соответственно.

Анализатор оборудован 2D-CCD детектором с многоканальной пластиной диаметром 40 мм и P43 фосфорным экраном и цифровой 12 битной камерой. Детектор делает 40 кадров в секунду динамическим диапазоном 1000 на каждый кадр.

Для экспериментов со спиновым разрешением анализатор оборудован спиновым детектором Ferrum VLEED с 90º дефлектором для 3D спин регистрации (рис. 2.1.6.1).

Для ввода и хранения образцов РФЭС спектрометр оборудован камерой загрузки образцов с высоковакуумной откачкой. Предварительная обработка образцов будет проводиться в препарационной камере. Препарационная камера оборудована устройством для нагревания образцов резистивным методом и электронным пучком, устройством для напыления металлических пленок, масс-спектрометром для контроля атмосферы, устройствами для очистки поверхности образцов методом скола и распылением пучком ионов. Измерение образцов проводится в аналитической камере на 6-координатном манипуляторе, позволяющем вращение и наклон образца, нагрев и охлаждение до низких температур в процессе съемки, сканирование поверхности. Для нейтрализации подзарядки непроводящих образцов и in situ исследований воздействия заряженными частицами в камере будет установлена пушка для облучения электронами. Для исследования профиля концентрации по глубине аналитическая камера оборудуется сканирующей ионной пушкой для распыления поверхности образца.

Спектрометр Рентгеновской Эмиссионной Спектроскопии (РЭС)/ Резонансного Неупругого Рентгеновского Рассеяния (СРНРР).

Проектирование мягких рентгеновских оптических систем предполагает преодоление ряда уникальных вызовов. Поскольку рентгеновское излучение в мягкой области легко поглощается материалами, требуется дифракционная оптическая система на основе решеток для их манипулирования. Такая оптическая система приводит к сильной оптической аберрации и поэтому ее дизайн требует тщательной проработки. Основу спектрометра в мягкой рентгеновской области составляют следующие оптические элементы: источник или входная щель, сферические дифракционные решетки-анализаторы и перемещаемый детектор. Основными характеристиками спектрометра являются разрешающая способность и эффективность. Каждый из этих параметров зависит от нескольких переменных в конструкции, и они сильно взаимосвязаны между собой.

Современные СРНРР спектрометры проектируются на основе круга Роуланда и использования решеток с переменным расстоянием между линиями (VLS - variable line spaced gratings). Последний подход приобретает наибольшую популярность в последние годы из-за меньшего размера и механической простоты спектрометра.

Схемы спектрометров на основе круга Роуланда и VLS-решетка представлены на рис. 2.1.6.2. Спектрометр работает в угловом диапазоне 120º в горизонтальной плоскости с вертикальным перемещением детектора 15º (Рис.2.1.6.3). Две высокоточные сферические VLS решетки (2400 линий/мм) позволят проводить измерения в интервале энергий 200 – 2000 эВ. В качестве детектора используется CCD-камера. Длина «руки»,

вращающейся в пределах 120º, составляет ~5 м, радиус вращения «руки» - 3 м. Энергетический интервал может быть увеличен за счет выбора дифракционных решеток.

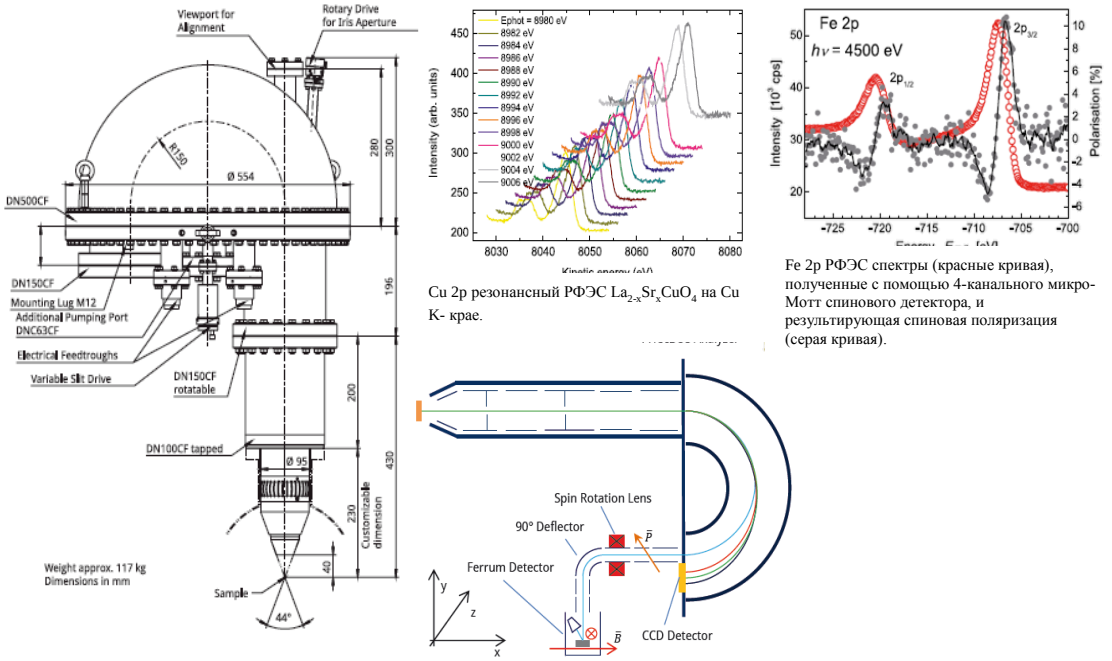

Рисунок 2.1.6.1. а) Анализатор Phoibos 150; б) Cu 2p ЖР РФЭС спектры в ВТСП; в) ЖР РФЭС Fe 2p спектры со спиновым разрешением; г) спиновый детектор Ferrum VLEED на анализаторе Phoibos 150.

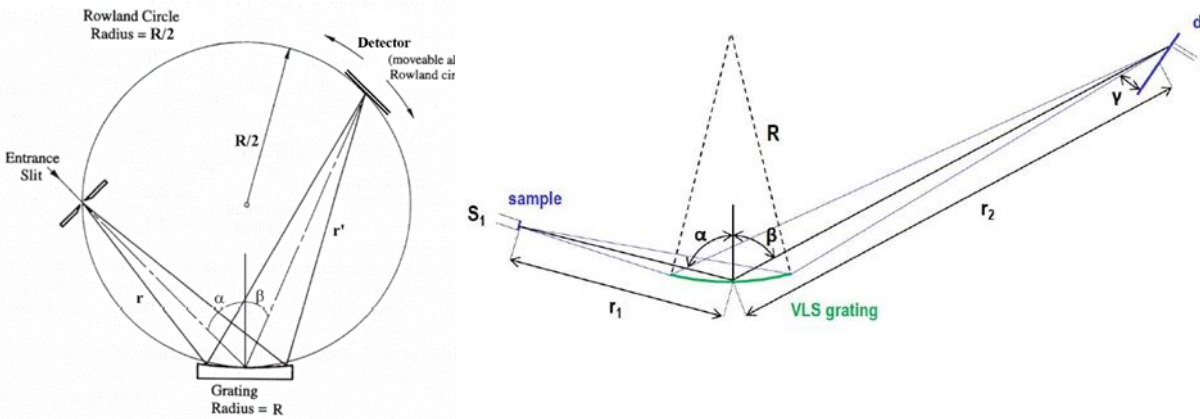

Рисунок 2.1.6.2. Рентгено-эмиссионные спектрометр на основе круга Роуланда (слева) и VLS-решеток (справа).

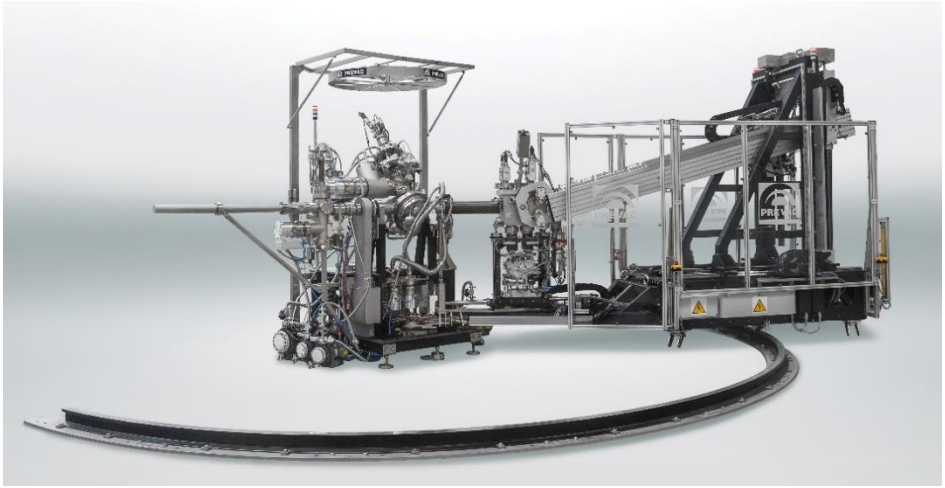

Рисунок 2.1.6.3. Внешний вид **РЭС/PHPP** спектрометра от компании PREVAC.

2. Секция «Рефлектометрия».

Назначение станции – разработка и реализация метрологических методик, аттестация детекторов мягкого рентгеновского излучения и различного рода оптических элементов. Предполагается выполнение работ в интересах широкого круга исследовательских организаций, высших учебных заведений и промышленных предприятий в рамках таких приоритетных направлений научных исследований, как индустрия наносистем и материалы, науки о жизни, рациональное природопользование, энергоэффективность и энергосбережение. Отрасли науки и технологии, в которых будут востребованы результаты работы станции: физика плазмы, астрофизика, нанолитография.

Требуется весь энергетический диапазон линии, от мягкой рентгеновской области (30-2000 эВ) до области энергий (2000-10000 эВ).

Станция оборудована двухкоординатным детектором на основе ПЗС матрицы (2 или 3 шт) и выполнен по технологии "back illuminated" (типа CCD47–20 BI AIMO, производство e2v Inc., Великобритания). Предназначен для исследования морфологии пучка до и после отражения от оптического элемента для оценки качества фокусировки и мониторинга наличия паразитных бликов и засветки.

Абсолютный детектор в качестве вторичного эталона: (не менее 3 шт.) высокостабильный кремниевый фотодиод (типа ФДУК-100УВ, разработка ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург). Предназначен для переноса единицы чувствительности для проведения калибровок абсолютной чувствительности детекторов. Проходит регулярную аттестацию для проведения процедуры сличения в международных метрологических центрах (например, PTB, Берлин, Германия).

Абсолютный криогенный радиометр-болометр в качестве первичного эталона. Высокоточный прибор с электрическим замещением мощности. Предназначен для самостоятельной калибровки вторичного эталона.

Особенности системы монохроматизации для метрологических измерений. Метрологические измерения в мягком рентгеновском диапазоне охватывают широкий спектральный диапазон, но, как правило, не требуют высокой степени монохроматизации тестирующего пучка. Исключение составляют калибровки спектральных свойств зеркал или кристаллов, где для измерения спектрального разрешения требуется высокая степень спектрального разрешения. Для охвата заявленного спектрального диапазона предложено использовать две принципиально различающихся оптические схемы: для низких энергий (30-2200 эВ) используется монохроматор на основе плоских дифракционных решеток в геометрии скользящего или нормального падения (модифицированный монохроматор типа Zeiss SX700). Для более жесткого диапазона (2200 - 6000 эВ) предложено использовать монохроматор на основе кристаллов Si (111). При использовании двухкристалльной схемы возможно использование механизма монохроматора для установки на него многослойных зеркал, в этом случае снижается спектральное разрешение монохроматора с одновременным возрастанием потока фотонов. Современные технологии изготовления многослойных зеркал позволяют покрывать спектральный диапазон 30-5000 эВ.

Экспериментальные объемы станции метрологии

Малый экспериментальный объем для калибровки детекторов и фильтров. Размер камеры - 150 x 150 x 500 мм. Возможность установки нескольких калибруемых детекторов. Разъемы для вывода сигналов и ввода питания (низковольтного и высоковольтного). Возможность смены детекторов и сканирования детекторами относительно пучка в рамках их апертуры без нарушения вакуума. Возможность установки нескольких калибруемых фильтров. Возможность смены фильтров и сканирования фильтрами относительно пучка в рамках их апертуры без нарушения вакуума. UHV совместимость, откачка ТМН с возможностью активации азотных ловушек и геттерного насоса.

Большой экспериментальный объем для калибровки космических спектрометров. Размер камеры - 1000 x 1000 x 1000 мм. Для метрологических задач часто требуется калибровка космического оборудования, несовместимого с UHV условиями. Поэтому необходима дополнительная непрогревная камера на HV (10^{-4} Па). Свой мощный вакуумный насос для поддержания динамического вакуума. На входе в камеру - пролетная азотная ловушка и 2 шибера: первый - с тонкой пленкой, второй - со стеклом.

В объеме - двухкоординатный манипулятор (вертикаль- горизонталь), точность позиционирования - 10 мкм, выдерживает нагрузку 20 кг, ход - 100 мм.

Рефлектометр представляет собой многоцелевой прибор для определения оптических свойств зеркал, многослойных структур, решеток, отражающих зонных пластинок, пленок, кристаллов в отражающей или просвечивающей геометрии. Эксперименты могут проводиться при фиксированной энергии фотонов как функция угла или как функция энергии при фиксированном угле. Главной особенностью этого рефлектометра является возможность работы с решетками или зеркалами реального размера длиной до 360 мм и весом до 4 кг. Образцы регулируются по шести степеням свободы благодаря новой сверхвысоковакуумной системе манипуляторов типа трипод. Существует возможность измерения отражающей способности различных поверхностей при любых углах падения как для s-, так и для p-поляризации. Сверхвысоковакуумная камера откачивается турбомолекулярным насосом 2000 л / с. Базовое давление лучше, чем 5×10^{-9} мбар. Кроме того, возможно использование азотной ловушки и титанового геттерного насоса. Рефлектометр расположен в чистом помещении.

3. Секция «Фотоэлектронная спектроскопия высокого давления».

Наиболее важными отличительными чертами концепции создания экспериментальной установки секции «Фотоэлектронная спектроскопия высокого давления» являются модульность и открытая архитектура – оснащение спектрометра дополнительными инструментальными узлами не требует перестройки вакуумного стенда и рентгенооптической схемы.

Высочайшая поверхностная чувствительность инструментальной реализации метода РФЭС с синхротронным излучением позволит получать перечисленную выше аналитическую информацию о поверхностном слое образца глубиной от 1 до 10 нм, в том числе, для определения состава адсорбционного слоя на поверхности субстрата и с высоким латеральным разрешением (двумерное картирование). В сочетании с кластерным ионным травлением возможно проведение экспериментов по профилированию химического состава образцов для исследования интерфейсных слоев, в том числе, многослойных пленок (трехмерное картирование), высвобождения биологически активных веществ из толщи биоразлагаемых матриц (депо) и коррозионных процессов (например, дефектоскопия сварных швов).

При оборудовании электронного спектрометра устройствами контролируемого нагрева образца и масс-спектроскопического анализа выделяющихся газов будет реализована регистрация термической деструкции и диффузионно-сегрегационных процессов для изучения деградации функциональных и защитных покрытий, полимеров,

биоорганических материалов для поиска возможных инженерных решений по утилизации твердых бытовых и промышленных отходов.

Оснащение спектрометра блоком смешения и подачи газовой смеси в сочетании системой дифференциальной откачки анализатора позволит исследовать химическое разложение образцов, функционализацию (введение гетероатомов для изменения эксплуатационных свойств) материалов и, наконец, исследование каталитически активных материалов на стадиях приготовления, эксплуатации и дезактивации катализаторов при давлениях реакционной среды до 0.01 атм. Именно на выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области катализа планируется, в основном, ориентировать работу секции.

Однако, в конструкцию прибора заложена возможность оперативного переключения в сверхвысоковакуумный режим для проведения измерений аналитического характера, исследований методом фотоэлектронной дифракции (необходим прецизионный манипулятор с 5 степенями свободы), спектроскопии рентгеновской абсорбции вблизи края поглощения (XANES, поверхностная EXAFS).

Предполагается двухкамерная (камера анализатора, камера подготовки / шлюзовая камера) схема спектрометра, предпочтительно с горизонтальной передачей изолированного держателя образца. Идентичная конструкция манипуляторов в обеих камерах должна обеспечивать управляемое термостатирование образца при температурах от 200К до 1200К с охлаждением корпуса манипулятора. Устройства нагрева – лазер с тыльной стороны образца, либо керамическая резистивная печка. Расположение плоскости образца в процессе записи спектров – вертикальное.

В качестве основного варианта обеспечения режима высокого давления рассматривается система с заполнением камеры анализатора газовой смесью при субатмосферном давлении и каскадной дифференциальной откачки узла регистрации. В этом случае первый каскад разрежения создается за счет минимизации просвета между конусом входной линзы и плоскостью образца. Планируется обеспечить оперативное (без потери сверхвысокого вакуума) отсоединение конуса высокого давления для проведения РФЭС измерений, не требующих наличия газовой среды, с кратно более высокой интенсивностью сигналов (рис. 2.1.6.4).

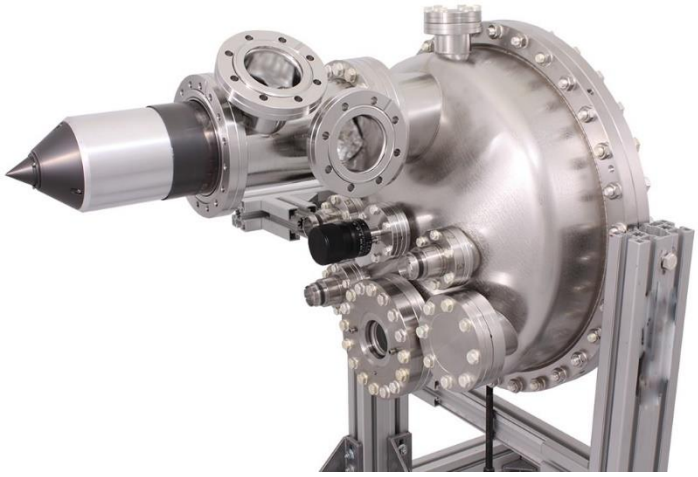

Рисунок 2.1.6.4. Энергоанализатор фотоэлектронов модели «Scienta Omicron R3000 High Pressure» со съемным конусом высокого давления и портами трехступенчатой дифференциальной откачки.

Принципиальная рентгенооптическая схема станции.

Разделение и монохроматизация пучков СИ

Три секции на линии «Электронной структуры» будут работать попеременно. Для такой реализации линии требуется:

а) общая оптическая линия

б) фокусирующие зеркала (ТЗ), для доставки монохроматизированного синхротронного излучения на образец каждой из секций.

Фокусирующие зеркала полного внешнего отражения.

Важным элементом схемы являются зеркала ПВО, поскольку на этих элементах теряется часть потока фотонов. Однако, если фокусирующие зеркала устанавливать под углом 0.5°, даже после четырех последовательных отражений получается приемлемый (более 10%) коэффициент отражения для энергий вплоть до 8 кэВ. После этой энергии коэффициент отражения быстро спадает (рис. 2.1.6.5).

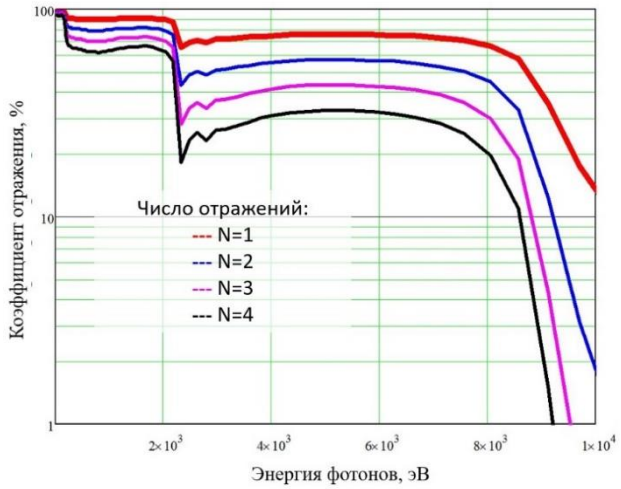

Рисунок 2.1.6.5. Многократное отражение от зеркал ПВО при θ = 0.5°

В случае работы с фотонами более низких энергий (до 2000 эВ) зеркало ПВО устанавливается под углом 2°, тогда параметры отражения зеркала соответствуют приведённым на рис. 2.1.6.6.

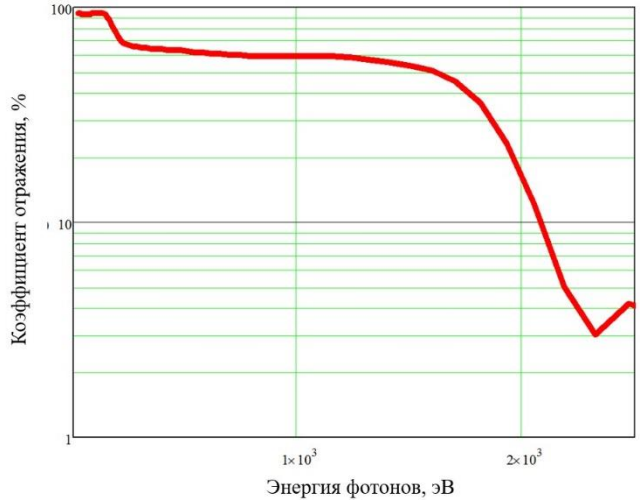

Рисунок 2.1.6.6. Отражение от зеркала ПВО при θ = 2°

Оптическая схема линии и компоновка станций

Оптическая схема линии и компоновка секций схематично представлены на рис. 2.1.6.7.

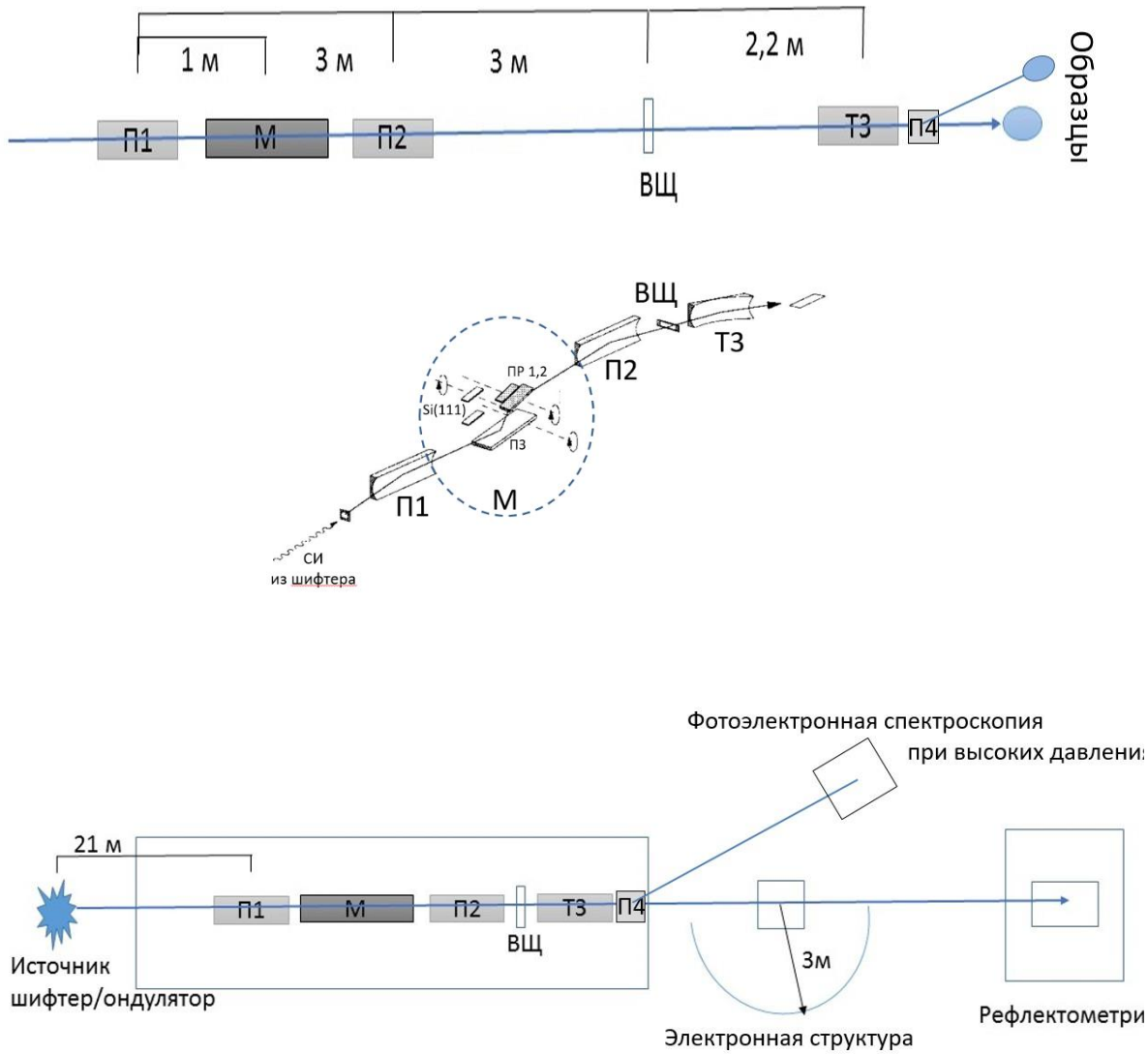

Рисунок 2.1.6.7. Оптическая схема линии, последовательность элементов (вверху), расположение элементов в пространстве (в середине), компоновка секций на станции (внизу).

П1 – параболоидное зеркало 1 коллимирует излучение из шифтера и отклоняет пучок на 1° пол горизонтали. Зеркало располагается на расстоянии 21 м от источника. Угол между пучком и поверхностью зеркала - 0.5˚, рабочая площадь – 400×8 мм^2. Ширина захваченного зеркалом пучка – 5 мм. После этого близкий к параллельному пучок СИ поступает на блок монохроматизации М, состоящий из плоского зеркала и плоской решетки (имеется возможность устанавливать одну из двух решеток с разной плотностью штрихов) для низкоэнергетического диапазона (50-2000 эВ) и моноблочного двухкристального Si для высокоэнергетического диапазона (от 2200 до 8000 эВ). Рабочие углы двухкристального монохроматора – от 10° до 65°. П2 - параболоидное зеркало 2 фокусирует монохроматизированный пучок на выходную щель (ВЩ)

ТЗ – тороидальное зеркало. Угол установки – 0.5° По существу, зеркало представляет собой цилиндрическую поверхность, которая фокусирует пучок по вертикали на расстоянии 15 метров. Горизонтальная фокусировка достигается путем деформации зеркала с большим радиусом кривизны (от 3 до 5 км), варьируя тем самым точку фокусировки в пределах 10-20 метров, на секциях «Электронная структура» или «Рефлектометрия». Сразу после тороидального зеркала установлено вводимое плоское зеркало П4, отклоняющее пучок на 4° для станции «Фотоэлектронная спектроскопия при высоких давлениях».

Для решения задач экспериментальной станции «Электронная структура» и обеспечения указанных выше режимов работы в качестве устройств генерации излучения могут быть использованы следующие устройства:

1. Сверхпроводящий ондулятор типа 1 (см. таблицу 2.3.3). В основном режиме работы поле в катушках устанавливается менее 0,25 Тл.

2. Сверхпроводящий шифтер (см. таблицу 2.3.1). В этом режиме устройство генерации СИ излучает непрерывный спектр в диапазоне от нескольких эВ до порядка 10 000 эВ при полях в центральном магните до 1 Тл.

3. Ондулятор на постоянных магнитах с возможностью перестройки поляризации излучения.

Компоновка устройств генерации излучения для экспериментальной станции «Электронная структура» с учётом всех особенностей будет разработана и утверждена на этапе технического проектирования.

2.2. Экспериментальные станции 2-й очереди

Создание экспериментальных станций на новом накопителе является процессом, отражающим, во-первых, востребованность разработанных методик исследования, которая выражается в недостатке экспериментального времени на уже имеющихся станциях для выполнения актуальных исследований и, во-вторых, необходимость разработки принципиально новых методов исследования вещества с использованием СИ. Именно поэтому во всех международных центрах синхротронного излучения период создания и запуска станций второй очереди составляет порядка 10 – 15 лет после физического запуска ускорительного комплекса.

В проекте создания ЦКП «СКИФ» также предполагается использовать мировую практику поочерёдного создания и ввода экспериментальных станций в эксплуатацию. При этом разработка концепций станций 2-й очереди планируется начать на этапе завершения технического проекта станций 1-й очереди в 2020 году с тем, чтобы процесс наращивания пользовательской инфраструктуры был непрерывным и эффективным.

В настоящее время начато формирование предварительного списка станций 2-й очереди, с обязательным указанием причин и особых условий, по которым планируемые работы не могут быть выполнены на станциях 1-й очереди (таблица 2.2.1).

Таблица 2.2.1. Предварительный список экспериментальных станций 2-й очереди.

	Направление исследований	Особые условия	Инициатор
1	Исследование структуры и формы вирусов методами рентгеновской дифракции	Специализированный комплекс помещений и установок для работы с биологически опасными и вредными веществами	ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор»
2	Проведение широкого круга исследований структуры, электронного строения, микроструктуры и состава вещества образцов различной природы	Особые условия на распределение экспериментального времени и унификацию компоновки станции, связанные с организацией учебного процесса	НГУ
3	Проведение широкого круга структурных исследований	Особые условия на распределение	НГТУ

	превращения вещества в технологических процессах электронно-лучевой и лазерной сварки, а также при воздействии потоков частиц на поверхность.	экспериментального времени и унификацию компоновки станции, связанные с организацией учебного процесса	
4	Исследования модификации поверхности материалов при облучении потоками плазмы, воспроизводящими условия на первой стенке термоядерного реактора	Потребляемая мощность до 100 кВт, напряжение выше 100 В.	ИЯФ СО РАН
5	Исследование электронной и спиновой структуры кристаллов для применений в наноэлектронике и спинтронике.	Энергетический диапазон – от 5 эВ до 2000 эВ, возможность быстрого изменения поляризации излучения, генерируемого вставным устройством.	ИФП СО РАН

Необходимо отметить, что в настоящее время в НГУ запущена магистерская программа подготовки кадров для работ в области СИ, разработка бакалаврской программы в НГУ, бакалаврской и магистерской программ в НГУ ведётся. Для целей организации учебного процесса планируется использовать создаваемую в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальной научной установки ВЭПП - 4 (на средства ИЯФ СО РАН) новую экспериментальную станцию, которая будет функционировать до запуска соответствующих станций (табл. 2.2.1, станция 2-2 и станция 2-3,) в ЦКП «СКИФ».

Одной из важнейших задач физики твердого тела является изучение электронной и спиновой структуры кристаллических веществ. Знание зонной структуры твердого тела позволяет предсказывать и находить перспективные материалы для нано- и спинтроники. Методом, который позволяет изучить зонную структуру кристаллических материалов, является фотоэмиссия с угловым и спиновым разрешением (Spin- ARPES: Spin and Angular Resolved Photoemission Spectroscopy). Метод ARPES широко используется на большинстве существующих синхротронов.

Диапазон используемых энергий в ARPES лежит в интервале 5-150 эВ, энергетическое разрешение 1-10 мэВ. Для изучения эффектов дихроизма очень полезно иметь поляризованное перестраиваемое излучение (линейное, круговое). Станция (табл. 2.2.1, станция 2-5), как правило, состоит из трех камер: загрузочная, сверхвысоковакуумная камера подготовки образца и измерительная. В качестве анализатора используются полусферические электростатические анализаторы. Для изучения спиновой структуры твердых тел анализатор дополняется детекторами Мотта. Важным условием является возможность работать при низких температурах (гелиевых), т.е. на охлаждаемом манипуляторе. Основной манипулятор должен обладать 6-ю степенями свободы (три линейных и три вращательных). Для ориентации кристаллов (кристаллографических осей) в аналитической камере важно иметь дифракцию медленных электронов (LEED).

2.3. Устройства генерации излучения

Устройства генерации излучения делятся на две основных категории:

1. Специализированные вставные устройства, размещаемые в прямолинейных участках, разделяющих элементы периодичности магнитной структуры основного кольца и оптимизированные для решения пользовательских задач.
2. Неспециализированные устройства – поворотные магниты, являющиеся частью основного кольца и имеющие характеристики, оптимизированные для движения электронного пучка.

Специализированные вставные устройства, в свою очередь, относятся к одному из трёх видов:

1. Шифтеры.
2. Вигглеры.
3. Ондуляторы.

Трёх и пяти полюсные магниты – «шифтеры», используются как альтернатива получения более жёсткого спектра синхротронного излучения по сравнению с излучением из поворотных магнитов. Многополюсные магнитные системы с поперечным полем - вигглеры – представляют собой знакопеременную последовательность магнитов вдоль траектории пучка электронов и используются не только для увеличения жёсткости излучения, но и для увеличения интенсивности излучения, которая увеличивалась кратно числу полюсов вигглера, а спектр излучения в жёсткой части спектра соответствует спектру синхротронного излучения. Ондуляторы отличаются от многополюсных вигглеров параметром, который для ондуляторов равен $K \leq 3$. Спектр излучения из ондуляторов отличается от спектра синхротронного излучения тем, что мощность излучения сосредоточена в узких энергетических диапазонах, что значительно увеличивает в них яркость источника. Большое преимущество излучение из ондуляторов приобретает при постановке их на накопители с малым эмиттансом, поскольку, кроме высокой спектральной яркости, их излучение обладает пространственной когерентностью. Широкое распространение в мире получили ондуляторы на постоянных магнитах, особенно с учётом прогресса в создании постоянных магнитов с большим полем насыщения, однако использование сверхпроводников имеет большое преимущество при создании устройств с коротким периодом. Основным низкотемпературным сверхпроводником, используемым при создании сверхпроводящих вставных устройств, является NbTi/Cu с различным

отношением сверхпроводника к меди. Сверхпроводник на основе Nb_3Sn/Cu имеет значительные преимущества, как по критической температуре, так и по критическому полю, но работа с ним является существенно более трудоёмкой.

При установке вставных устройств с сильным магнитным полем на накопитель в качестве источника излучения необходимо принимать в расчёт то, что магнитное поле вигглера может внести значительное возмущение структурных функций накопителя, изменить параметры пучка электронов, повлиять на динамику пучка в накопителе.

Основные спектральные характеристики специализированных вставных устройств, которые предполагается разместить на основном кольце ЦКП «СКИФ» представлены на рис. 2.3.1.

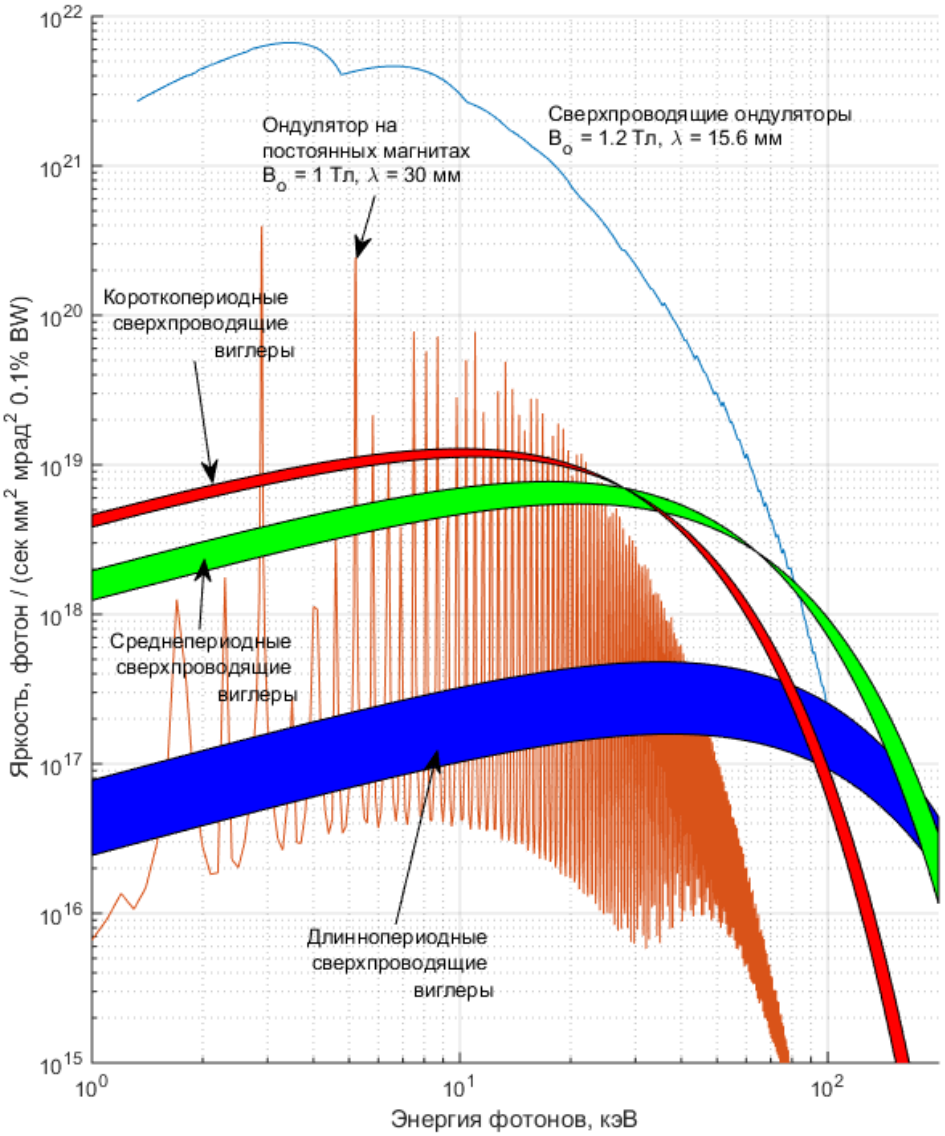

Рисунок 2.3.1. Спектральные характеристики вставных устройств – генераторов СИ нового источника.

Шифтер создаёт одиночный источник излучения из центрального полюса трёх или пяти полюсной магнитной системы. При этом крайние полюса (по 2 с каждой стороны от рабочего) необходимы для того, чтобы при изменении магнитного поля точка излучения оставалась неизменной. Основные параметры и характеристики сверхпроводящего (СП) шифтера представлены в таблице 2.3.1 и на рис. 2.3.2.

Таблица 2.3.1. Параметры пяти полюсного СП шифтера.

Параметр	Значение
Полная длина, м	1
Длина основного полюса, м	0,1
Межполюсный зазор, мм	12
Амплитуда магнитного поля, Т	4
Средняя мощность СИ, кВт	до 5

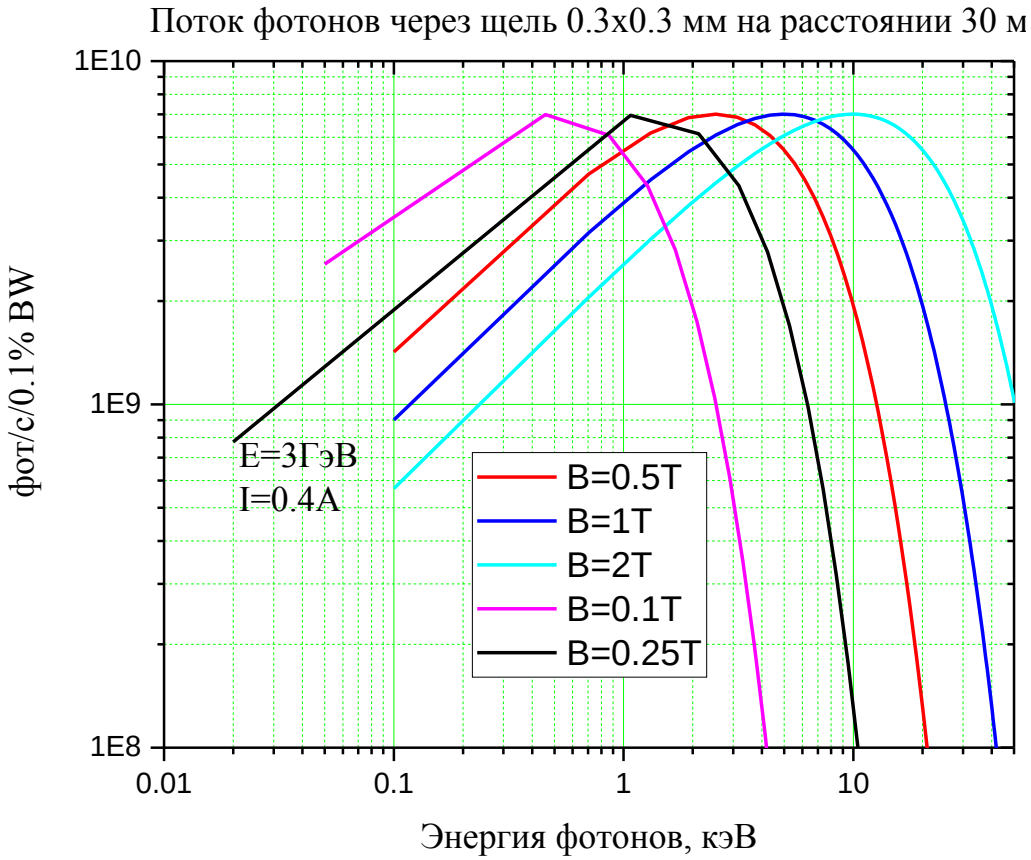

Рисунок 2.3.2. Спектральные характеристики пяти полюсного СП шифтера, при различном значении магнитного поля

Основные параметры и характеристики СП вигглера представлены в таблице 2.3.2 и на рис. 2.3.3. Основной особенностью такого устройства на кольце с энергией 3 ГэВ является возможность получения заметного количества квантов с энергией до 150 кэВ. При этом следует отметить, что основной рабочий диапазон составляет 10 – 120 кэВ.

Таблица 2.3.2. Параметры СП вигглера.

Параметр	Значение
Период, мм	53
Полная длина, м	1.7
Число периодов	30
Межполюсный зазор, мм	14.4
Внутренний размер вакуумной камеры ШхВ., мм	60x10
Амплитуда магнитного поля, Т	4.5
Средняя мощность СИ, кВт	до 85

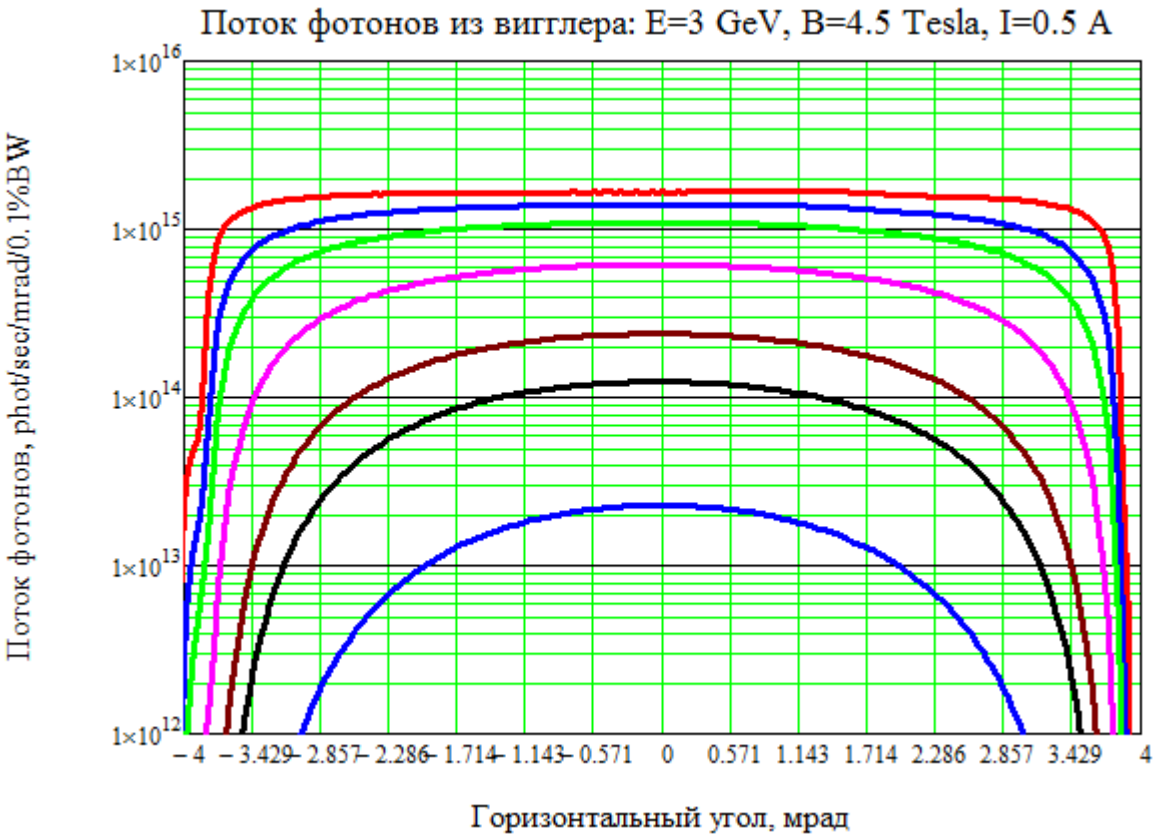

Рисунок 2.3.3. Угловое распределение потока фотонов СП вигглера для различных энергий: красная линия – 10 кэВ, тёмно синяя линия – 20 кэВ, зелёная линия – 30 кэВ, розовая линия – 50 кэВ, коричневая линия – 80 кэВ, чёрная линия – 100 кэВ, синяя линия – 150 кэВ.

Важной особенностью вигглера является широкое угловое распределение почка фотонов, которое позволяет на большом расстоянии от накопителя иметь полную ширину в несколько десятков сантиметров (рис. 2.3.4.).

Для решения научных задач экспериментальных станций 1-й очереди ЦКП «СКИФ» предлагается использовать набор сверхпроводящих ондуляторов (тип 1 и тип 2). Основное преимущество ондуляторов такого типа является возможность получения больших полей при относительно низком межполюсном расстоянии, а также возможность быстрой перестройки по энергии, путём изменения величины магнитного

поля в катушках. Это позволяет получить яркие пучки СИ на образце и выполнять быстрые исследования, в том числе, связанные с перестройкой энергетического спектра. Основные параметры и характеристики СП ондуляторов представлены в таблице 2.3.3 и на рис. 2.3.5. – 2.3.8.

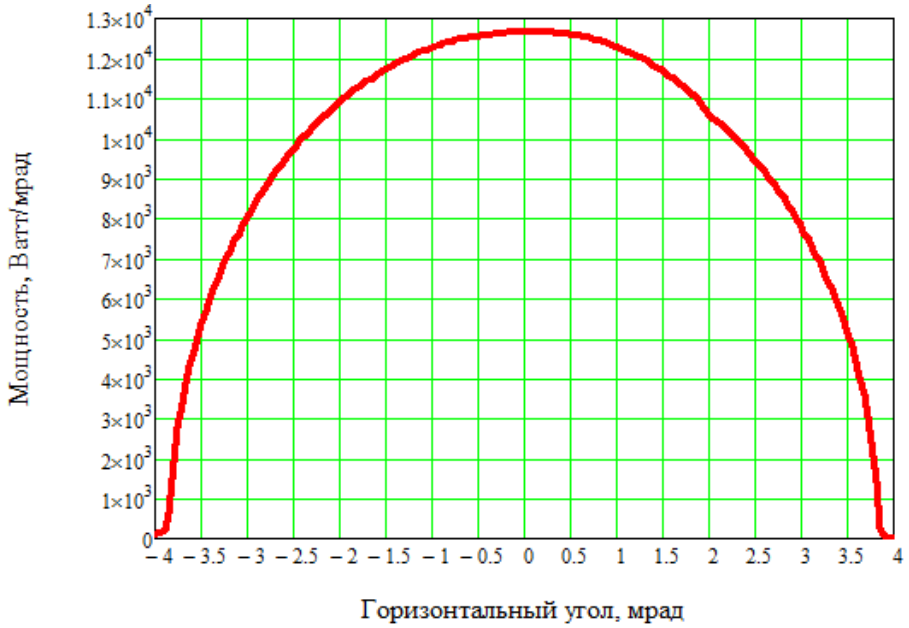

Рисунок 2.3.4. Угловое распределение полной мощности СП вигглера

Таблица 2.3.3. Параметры СП ондуляторов.

Параметр	**Значение**
Тип 1	
Период, мм	15.6
Полная длина, м	2
Число периодов	128
Межполюсный зазор, мм	8
Внутренний размер вакуумной камеры ШхВ, мм	60x6
Амплитуда магнитного поля, Т	1.2
Параметр отклонения (ондуляторности) K	1.75
Фазовая ошибка, град.	<3
Средняя мощность СИ, кВт	до 10
Тип 2	
Период, мм	18
Полная длина, м	2.3
Число периодов	128
Межполюсный зазор, мм	8
Внутренний размер вакуумной камеры ШхВ, мм	60x6
Амплитуда магнитного поля, Т	1.7
Параметр отклонения (ондуляторности) K	2.85
Фазовая ошибка, град.	<3
Средняя мощность СИ, кВт	до 15

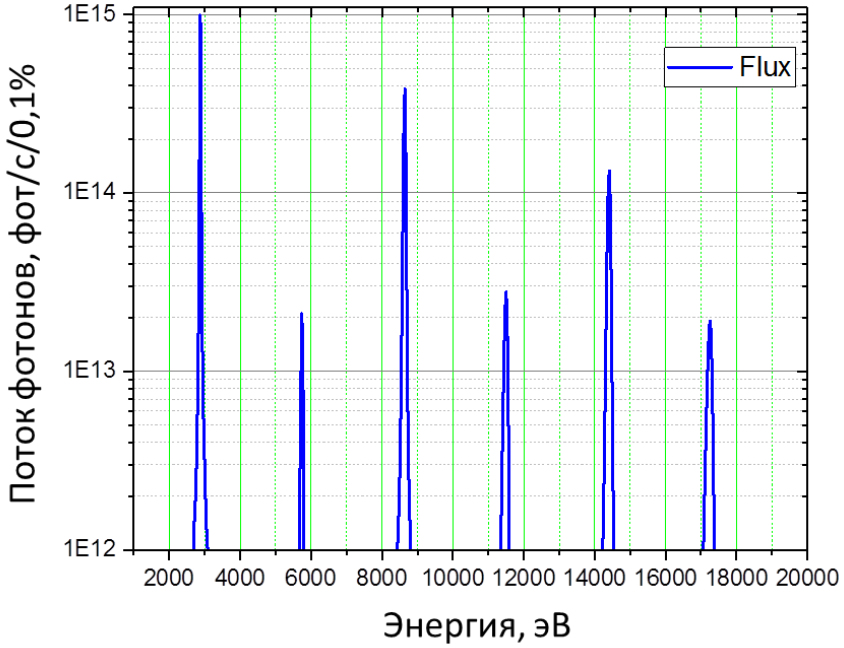

Рисунок 2.3.5. Поток фотонов из СП ондулятора тип 1 на расстоянии 15 м от источника излучения через щель 0,3x0,3 мм. Ток в накопителе 400 мА, поле B = 0,92 Тл, оптимизация на рабочую энергию 14,4 кэВ.

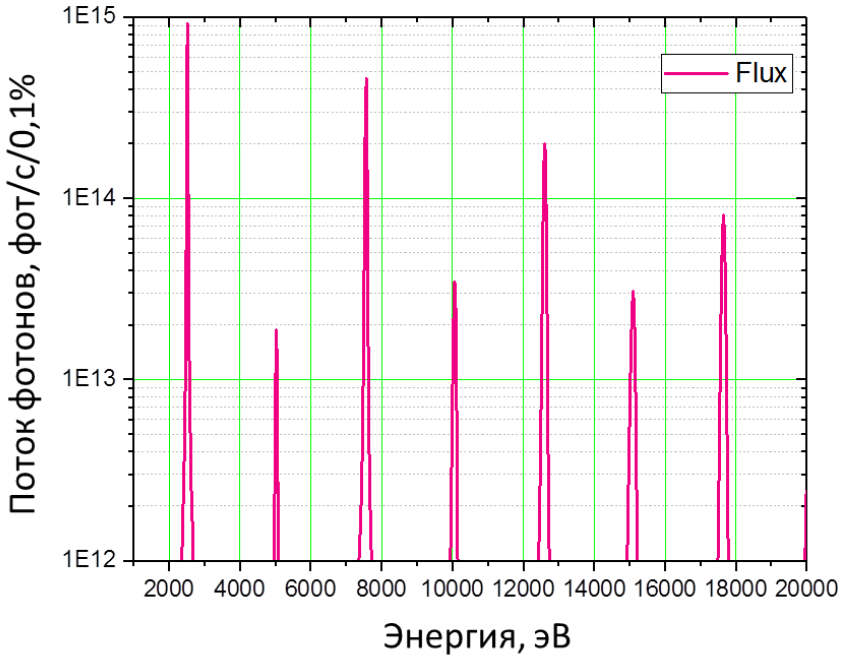

Рисунок 2.3.6. Поток фотонов из СП ондулятора тип 1 на расстоянии 15 м от источника излучения через щель 0,3x0,3 мм. Ток в накопителе 400 мА, поле B = 1,05 Тл, оптимизация на рабочую энергию 12,6 кэВ.

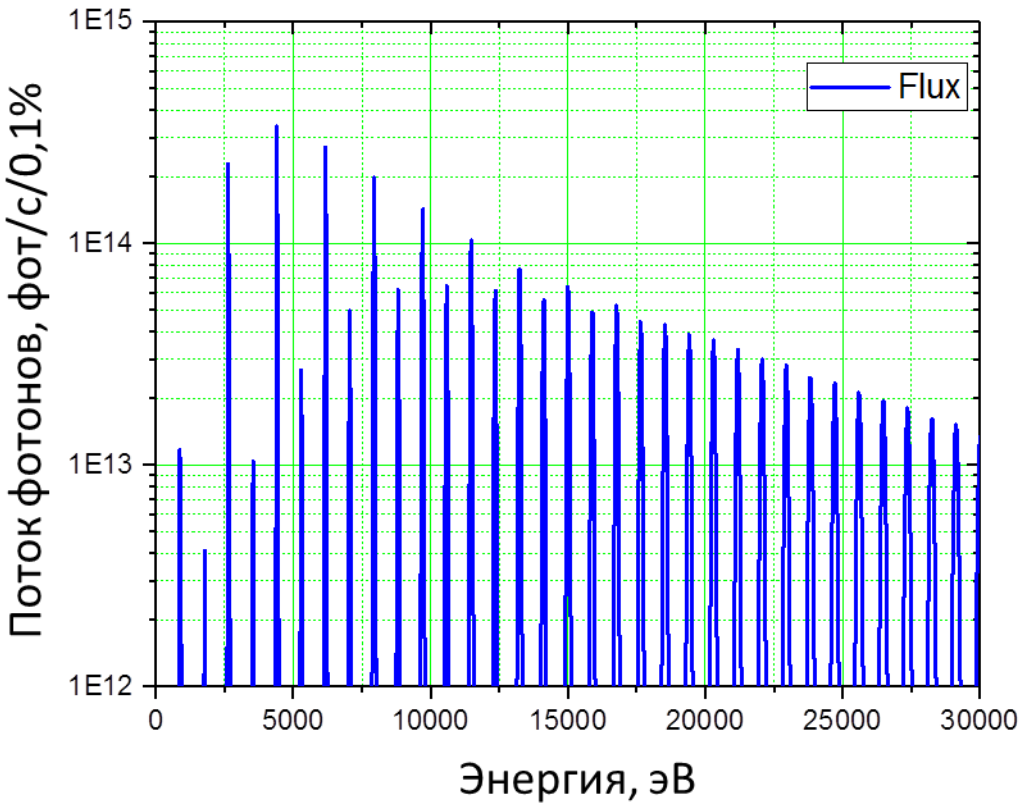

Рисунок 2.3.7. Поток фотонов из СП ондулятора тип 2 на расстоянии 15 м от источника излучения через щель 0,3x0,3 мм. Ток в накопителе 400 мА, поле B = 1,76 Тл.

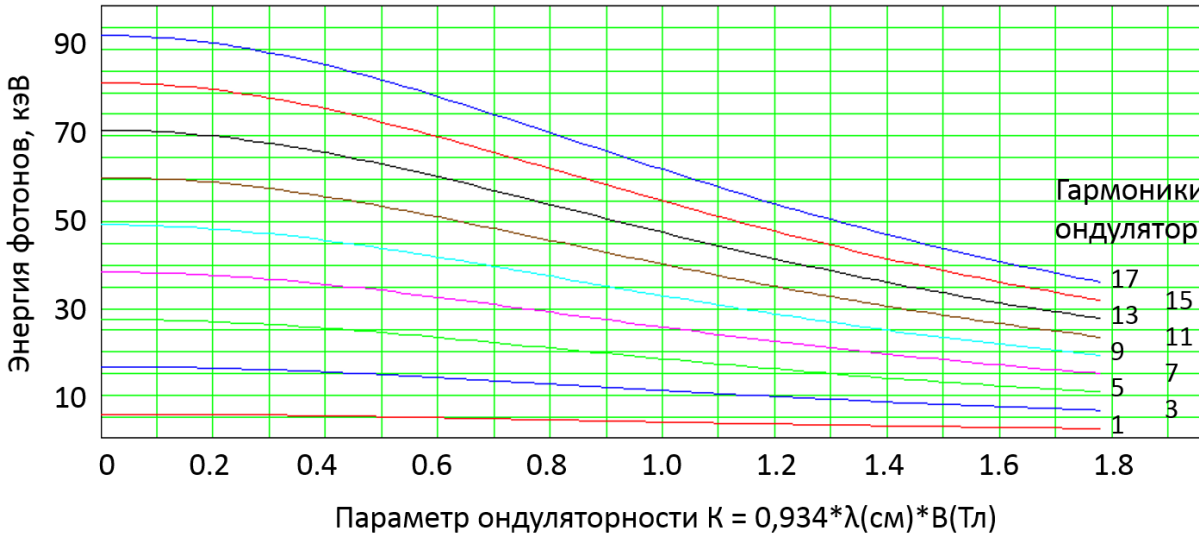

Рисунок 2.3.8. Энергии гармоник СП ондулятора тип 1 в зависимости от параметра ондуляторности.

2.4. Фронтэнды экспериментальных станций

Фронтэнд - часть накопителя, предназначенная для вывода синхротронного излучения на экспериментальную станцию. Он располагается в ускорительном зале и содержит набор элементов, предназначенных для предварительного формирования оптических характеристик пучка СИ (геометрических размеров и спектральных параметров), обеспечения радиационной защиты пользователя и вакуумной защиты ускорителя. Современные тенденции в создании фронтэндов нацелены на максимальное использование его длины для размещения рентгенооптических элементов как можно ближе к источнику излучения.

Реализация этих задач достигается путём использования устройств коллимации, приема и контроля положения прямого пучка синхротронного излучения, сопряжения вакуума накопителя с вакуумом канала и защиты по вакууму в случае аварийного прорыва атмосферы в канал или в накопитель. Система радиационных затворов и радиационных обжимок обеспечивает радиационные условия в экспериментальном помещении на уровне, удовлетворяющем санитарным нормам.

Требования к фронтэнду:

- выходной поперечный размер пучка СИ из фронтэнда определяется техническим заданием на проектирование экспериментальной станции;
- наличие ограничивающих коллиматоров и приёмников излучения для формирования пучка синхротронного излучения, защиты критичных элементов от электрон-позитрон-фотонных ливней;
- наличие прогревных радиационных затворов (1 или 2 в зависимости от типа устройства генерации)
- наличие радиационных обжимок, исключающих попадание излучения, рассеянного на большие углы, в экспериментальные помещения;
- вакуум при закрытых шиберах не хуже 10^{-10}Торр;
- наличие системы контроля и непрерывного протоколирования состояния вакуума и положения всех значимых элементов фронтэнда;
- наличие системы быстрого закрывания при вакуумной аварии (время закрывания аварийного шибера – не более 20 мс);
- наличие гибких сильфонных соединений между отдельными элементами для их юстировки;
- наличие систем водяного охлаждения элементов, контроля температуры и протока воды;

- наличие специализированных блоков для разделения участков канала по вакууму;
- наличие систем трассировки и мониторинга пучка СИ;
- резервирование мест для установки рентгеновской оптики;
- выполнение требований безопасности в аварийных случаях.

Длина канала фронтэнда (от источника излучения до стены биозащиты) составит около 24 метров. При этом первые 9 – 10 метров не используются для установки элементов, поскольку вакуумные камеры канала и накопителя расположены слишком близко, а основными элементами на этих участках являются магниты основного кольца. Таким образом, полезная часть канала фронтэнда составляет длину до 15 метров.

Фронтэнды экспериментальных станций ЦКП «СКИФ» делятся на четыре основных типа:

- фронтэнды сверхпроводящих вигглеров – самые нагруженные каналы (рис. 2.4.1). Средняя мощность СИ, излучаемая СП вигглерами достигает величины 85 кВт в широком пучке с горизонтальной расходимостью в 6 мрад, поэтому требуются особые меры для обеспечения тепловой защиты экспериментальных станций;

- фронтэнды сверхпроводящих ондуляторов и ондуляторов на постоянных магнитах – средней нагруженности (рис. 2.4.2.). Типичная мощность СИ из таких устройств составляет от 5 до 15 кВт. Отличительной особенностью этих каналов является сосредоточение основной мощности в узком конусе порядка 0,1 мрад;

- фронтэнды сверхпроводящих шифтеров и поворотных магнитов – низкой нагруженности (рис. 2.4.3). Типичная мощность СИ из таких устройств – до 5 кВт;

- фронтэнды сверхвысоковакуумных каналов из ондуляторов, шифтеров и поворотных магнитов (рис. 2.4.4). Отличительной особенностью данных каналов является общий вакуум экспериментальной станции и ускорителя. К таким фронтэндам предъявляются особые требования на обеспечение сверхвысокого вакуума и вакуумную защиту ускорителя.

Набор типовых элементов фронтэндов представлен в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1. Набор типовых элементов фронтэндов и описание их основных характеристик

Обозначение	Элемент	Описание
К1	Коллиматор	Неподвижный ограничивающий формирователь пучка синхротронного излучения из сплава меди с алюминием (GlidCop) с водяным охлаждением. Обеспечивает поглощение периферийной части и предварительную коллимацию пучка СИ. Необходим контроль температуры. Размер индивидуален для фронтэнда каждого типа.
ПИ	Приемник излучения	Предназначен для поглощения теплового излучения центральной части пучка СИ и защиты стоящих после него элементов канала от перегрева, водоохлаждаемый. Необходим контроль температуры. Подвижный, охлаждаемый водой выполняется из сплава меди с алюминием (GlidCop). Может вводиться и выводиться из канала. Управляется как вручную, так и автоматически.
Ш1	Входной шибер	Первый цельнометаллический разделитель вакуума ускорителя от вакуума экспериментальной станции. Дистанционное управление, спаренное с приемником излучения.
РЗ	Радиационный затвор	Предназначен для радиационной защиты пользователей от электронных ливней. Запорный элемент эльконайт в нержавеющей рубашке. Общая длинна запорного элемента вдоль канала порядка 300 мм. На фронтальной части запорного элемента – вольфрам - молибденовый сэндвич.
БШ1	Быстрый шибер	Часть аварийной системы защиты вакуума. Время срабатывания <10 мс.
К2	Коллиматор	Медная обойма, охлаждаемая водой, предохраняющая от электрон-позитрон-фотонных ливней и дополнительно ограничивающая размер пучка СИ. Размер и местоположение индивидуально для каждого фронтэнда.
ББФ1	блоки с бериллиевыми фольгами	Медные обоймы с бериллиевыми фольгами для разделения участков фронтэнда по вакууму. Необходимо водяное

		охлаждение, контроль температуры. Является неподвижным, и неуправляемым. Возможно 3-х и 4-х фольговое исполнение. Фольга №1 – Вакуумно неплотная, служит для тепловой защиты последующих бериллиевых фольг. Между фольгами №1 и №2 вакуум один с вакуумом ускорителя. Фольги №2 и №3 имеют собственную систему откачки и контроля вакуума. Фольги №3 и №4 имеют собственную систему откачки и напуска атмосферы, контроля вакуума. Фольга № 4 – съёмная, замена фольги определяется по степени деградации вследствие воздействия атмосферного давления со стороны экспериментальной станции. В трёхфольговом исполнении, фольга №3 удаляется. Вакуумные объемы между фольгами откачиваются независимо друг от друга. Во фронтэде из вигглера перед блоками бериллиевых фольг возможна установка графитового фильтра для защиты от перегрева. Необходим температурный контроль фильтра.
К3+ МП	Коллиматор совмещенный с датчиком положения пучка	Медная обойма, охлаждаемая водой, для формирования геометрических размеров пучка, выходящего из фронтэнда. Может быть совмещена с датчиком положения пучка.
	Рентгеновская оптика	Предусматривается место во фронтэнде для дополнительных оптических элементов пользователя канала
ББФ2	блоки с бериллиевыми фольгами (одна фольга сменная)	Для дополнительного разделения участков фронтэнда и канала по вакууму. Охлаждаемые водой медные обоймы с окнами. Являются неподвижными и неуправляемыми. Необходим контроль температуры. Выходная фольга сменная, предохранительная. Вакуумные объемы между фольгами откачиваются независимо друг от друга.
БШ2	Автоматический шибер	Часть аварийной системы защиты вакуума. Время срабатывания <10 мс.

Ш2	Выходной шибер	Предназначен для разделения вакуума фронтэнда от вакуума экспериментальной станции. Управляется как вручную, так и автоматически. Необходим, контроль температуры.

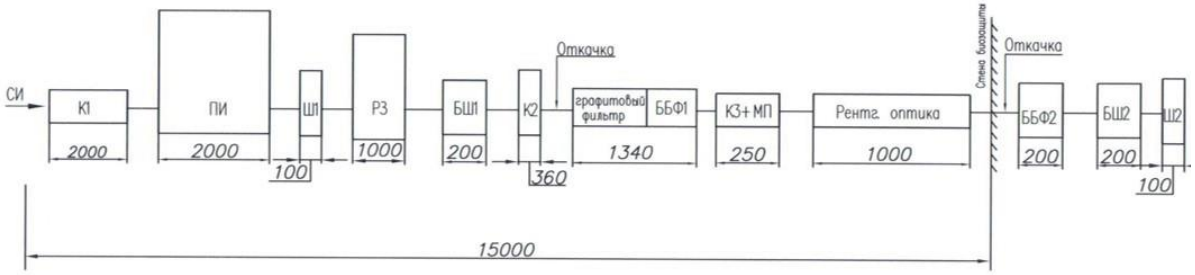

Рисунок 2.4.1. Схема фронтэнда из СП вигглера.

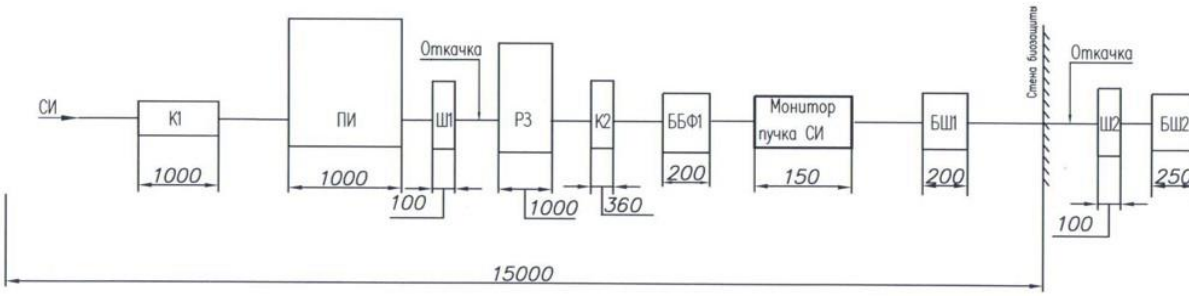

Рисунок 2.4.2. Схема фронтэнда из ондуляторных каналов.

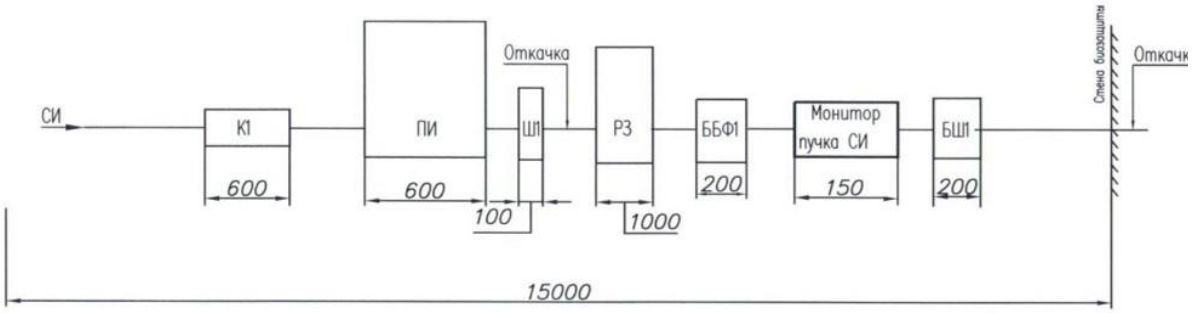

Рисунок 2.4.2. Схема фронтэнда из шифтеров и поворотных магнитов.

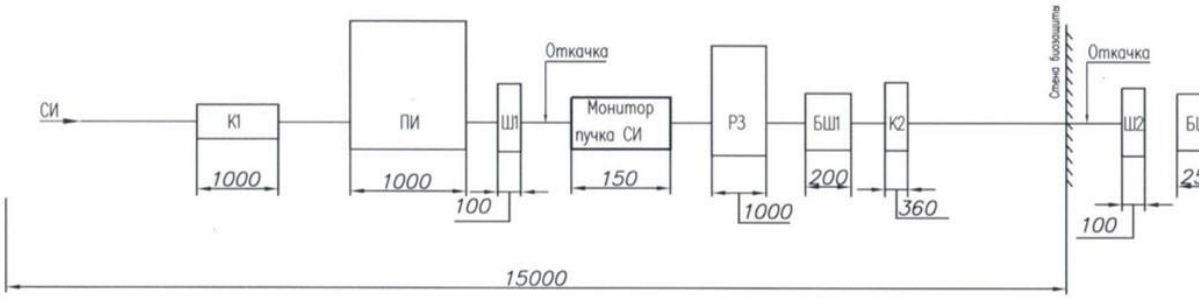

Рисунок 2.4.2. Схема фронтэнда сверхвысоковакуумного канала.

Технические трассы и системы фронтэндов:

- Трасса дистиллята с системой регистрации показаний и сигнализации датчиков расходомеров;
- Система откачки, в том числе, дифференциальной для сверхвысоковакуумного канала;
- Система контроля вакуума;
- Система контроля температуры;
- Система контроля радиационной обстановки и система контроля доступа;
- Система автоматизации и управления с возможностью ручного управления пользователем и оператором ускорительного комплекса

2.5. Лабораторный корпус

Основное назначение лабораторного корпуса ЦКП «СКИФ» - создание для пользователей адекватных условий пробоподготовки и проведения комплементарных исследований в непосредственной близости от экспериментальных станций. Именно поэтому в состав оборудования корпуса входят:

- химические, электрохимические и физические лаборатории, включающие в себя необходимый набор оборудования для обработки и подготовки образцов соответствующими методами;
- термоучасток, необходимый для создания тепловых условий для воздействия на образцы в области от криогенных температур до 2000 градусов Цельсия;
- комплекс механических мастерских, включая прецизионную обработку высокоточных элементов и конструкций сопряжения узлов экспериментальных станций, для быстрой апробации разработанных в ЦКП новых исследовательских методов;
- комплекс учебно-лабораторных помещений для реализации программ подготовки кадров высокой квалификации;
- комплекс учебно-лабораторных помещений для реализации программ подготовки кадров высокой квалификации и исследований, комплементарных к работам, проводимых непосредственно на источнике синхротронного излучения, включающий модули для проведения современных исследований следующими методами: электронной микроскопии (создаваемый с учётом особых требований на виброзащищённость помещений), дифракционных исследований (позволяющий исследовать все типы образцов методами монокристальной и порошковой дифракции и малоуглового рассеяния), спектроскопии (ИК-, КР-, оптической и УФ, ЯМР и ЭПР, оптической микроскопии, термического анализа и калориметрии, исследования дисперсности частиц, дзета-потенциала поверхности, удельной площади поверхности, пористости;
- вычислительный центр для обеспечения как ускорительной, так и пользовательской инфраструктуры необходимыми вычислительными мощностями и размерами хранилищ данных (подробнее п. 2.6);
- комплекс компьютерных классов для работы с оборудованием (как на станциях синхротронного излучения, так и в учебно-лабораторном корпусе) в режиме удаленного доступа, обработки данных, работы с литературой и базами данных, проведения учебных занятий под руководством преподавателя и самостоятельно;

- офисные помещения для сотрудников лабораторного корпуса;
- аудитории для совещаний / заседаний / учебных занятий;
- необходимый комплекс инженерных сетей и складских помещений, в том числе, обеспечивающих особые условия хранения образцов.

Более детально условия на помещения лабораторного комплекса описаны в главе 5 эскизного проекта. Оборудование лабораторного комплекса предоставляется пользователям ЦКП «СКИФ» на общих основаниях.

2.6. Вычислительный центр

С целью управления ускорительным комплексом, а также предварительной обработки экспериментальных данных предполагается создание локального вычислительного центра, который будет решать следующие задачи:

- Хранение и обработка данных, генерируемых системой управления комплекса.
- Временное хранение данных, получаемых с экспериментальных станций.
- Оперативная обработка данных, получаемых с экспериментальных станций.
- Обеспечение экспериментальных групп локальными вычислительными ресурсами и ресурсами хранения данных.
- Обеспечение системы управления комплексом и экспериментальных станций централизованной системой баз данных для хранения конфигурационных данных, информации о условиях проведения экспериментов.

Для решения перечисленных задач вполне достаточно создание локального вычислительного центра со следующими характеристиками:

- Число вычислительных ядер – 1000.
- Общий объем системы хранения, включая ленточное хранение – 2 ПБ.
- Объем хранения системы баз данных – 20 ТБ.
- Поддержка NUMA расширения.

Возможность использования виртуализованной архитектуры вычислительного кластера позволит на базе физических вычислительных узлов запускать виртуальные машины, адаптированные к запросам пользователей.

Комплекс программного обеспечения центра должен включать:

- средства управления и мониторинга физических узлов;
- средства администрирования, включая средства создания виртуальных машин, администрирование большого числа пользователей, развитые механизмы управления правами доступа и т.п.;
- система управления распределенными вычислениями;
- централизованная система управления базами данных;
- высокоуровневое программное обеспечение для обработки данных с пользовательских станций.

Предполагается создание надежного сетевого соединения компьютерного центра со всеми экспериментальными станциями со скоростью не менее 10 Гбит/с. Вычислительный центр должен обладать выделенным внешним каналом связи со скоростью не менее 1 Гбит/с.

Для размещения центра необходимо кондиционированное помещение с подводом электрической мощности не менее 100 кВА с резервированием. Данное помещение планируется выделить в лабораторном корпусе.

3. Накопитель электронов

3.1. Магнитная структура

Состав ускорительного комплекса и основные параметры

Общая схема ускорительного комплекса показана на рис.3.1.1.

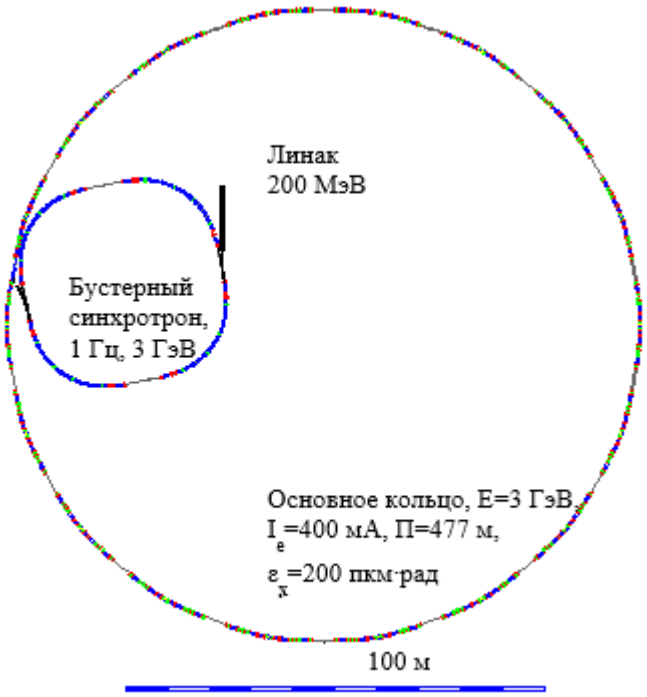

Рисунок 3.1.1. Схема размещения основных ускорительных систем комплекса

Комплекс включает в себя следующие компоненты:

- линейный ускоритель на 200 МэВ (с электронной пушкой);
- низкоэнергетическая транспортная линия;
- бустерный синхротрон;
- транспортный канал высокой энергии;
- основное кольцо (синхротрон).

Магнитная структура основного кольца

В качестве основной магнитной структуры источника СИ была выбрана популярная в последнее время схема, называемая «Гибридный мультибенд ахромат» (HMBA). Даная структура предложена для проекта ESRF-EBS и предполагает использовать дипольные магниты с продольной вариацией поля. Аналогичные структуры рассматриваются для проекта модернизации источника СИ APS (США) и для нового источника СИ HEPS (Китай).

Во всех вышеперечисленных проектах предполагается использовать ячейку с семью дипольными магнитами. Секступольные линзы для подавления хроматизма расположены в специально организованных дисперсионных бампах в промежутках между первым и вторым диполем и симметрично между шестым и седьмым (рис.3.1.2). Результатом такого размещения является повышенная эффективность секступольных линз и соответственно меньшие силы этих линз для достижения необходимых значений хроматизма. Другой особенностью данного подхода является возможность ослабления геометрических аберраций высших порядков за счет правильного подбора набега бетатронных фаз между одинаковыми квадрупольными линзами. Структура позволяет обеспечить с хорошей точностью минус-единичную трансформационную матрицу между одинаковыми секступольными линзами, что и обеспечивает данную возможность.

Схема суперпериода проектируемого источника на основе HMBA представлена на рис.3.1.2, а оптические функции суперпериодов на рис.3.1.3.

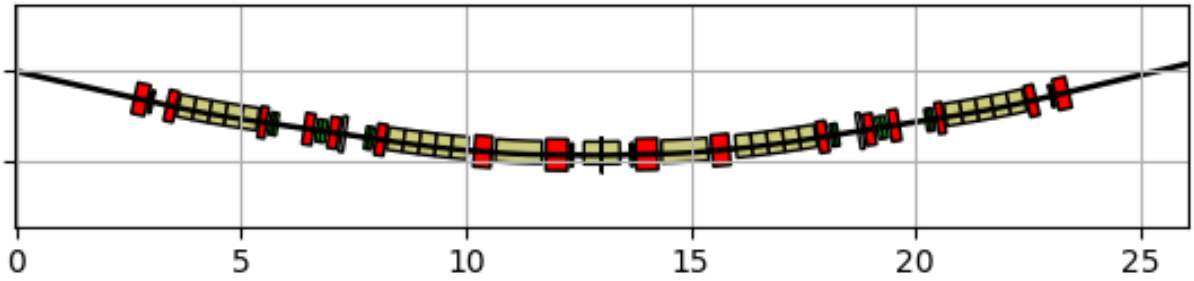

Рисунок 3.1.2. Геометрическая схема суперпериода магнитной структуры накопителя

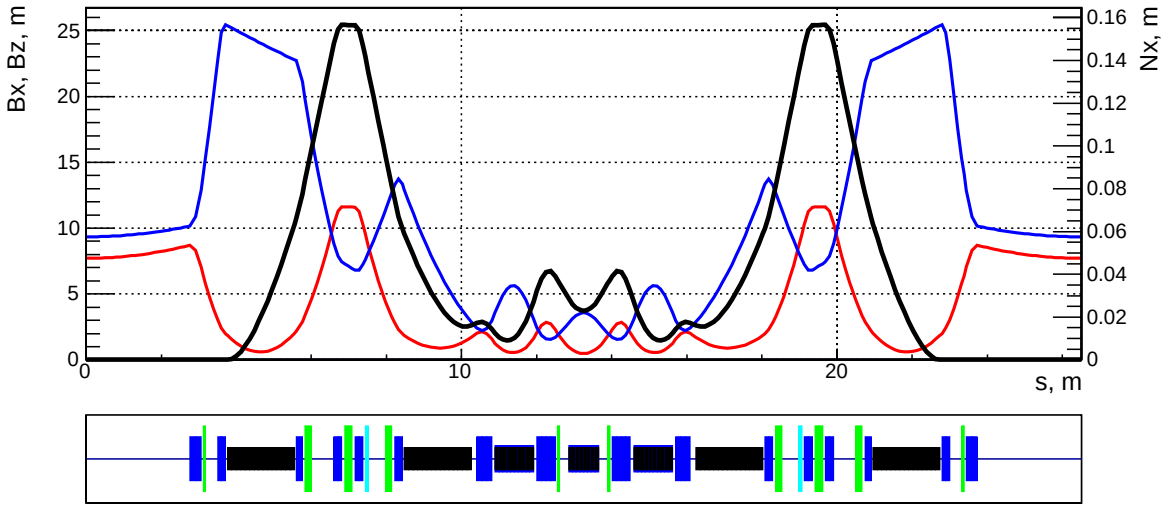

Рисунок 3.1.3. Оптические функции одного супер-периода

Структура состоит из 18 идентичных супер-периодов. Длинный промежуток - 5.42м. Периметр ускорителя выбран под ВЧ-частоту — 178.47 МГц. Структура содержит 2 ВЧ-резонатора, расположенных через половину оборота относительно друг друга. Еще в одном промежутке расположен резонатор третьей гармоники с частотой 535.41 МГц, который используется для удлинения сгустка, необходимого для подавления внутрисгусткового рассеяния (основного источника увеличения эмиттанса пучка). Параметры структуры без учета внутрисгусткового рассеяния представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Параметры базовой структуры (на нулевом токе)

Параметр	**Значение**
Энергия	3 ГэВ
Число супер-периодов	18
Периметр	477.06 м
Частота обращения	628.4167 кГц
Бетатронные частоты	43.2/11.88
Натуральный хроматизм	–63.37/–49.64
Эмиттанс пучка	186 пм·рад
Энергетический разброс	$6.33 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент уплотнения орбит	$2.4618 \cdot 10^{-4}$
Потери на оборот	290.81 кэВ
Времена затухания	21.67/32.83/22.11 мс
Безразмерные декременты затухания	1.5149/1.000/1.4851
Кратность ВЧ	285
ВЧ-частота	178.47 МГц
ВЧ-частота резонатора 3 гармоники	535.41 МГц
ВЧ-напряжение	2 МВ
ВЧ-напряжение резонатора 3 гармоники	0.6 МВ
Размер ВЧ-сепаратрисы	0.062
Синхротронная фаза	171.64°
Синхронная частота	0.00271
Длина сгустка без резонатора 3 гармоники	0.437 см
Длина сгустка	1.45 см
Полный ток	400 мА
Число сгустков	255 (10% разрыв цуга – 29 сепаратрис)
Ток сгустка	1.57 мА
Число частиц в сгустке	$1.55 \cdot 10^{10}$
Горизонтальная апертура	1.3 см
Вертикальная апертура	1.3 см

Горизонтальный акцептанс	0.00146 см·рад
Вертикальный акцептанс	0.00108 см·рад

Коррекция хроматизма и динамическая апертура

Уменьшение поперечного фазового объема (эмиттанса) пучка требует более жесткой оптики циклического накопителя, что приводит к возрастанию натурального хроматизма, для компенсации которого требуется более сильные секступольные линзы. Использование специализированных структур типа DBA, MBA или TME приводит к тому, что с уменьшением эмиттанса падает дисперсионная функция и вместе с тем падает эффективность хроматических секступольных линз. Таким образом, динамическая апертура накопителей с ультра-малым эмиттансом пучка является одним из главных ограничений.

Последнее поколение источников СИ использует новый подход в структуре оптики накопителя – «Гибридный мультибенд ахромат» (HMBA). Эта ячейка имеет малую дисперсионную функцию в середине ячейки, а на краях создаются дисперсионные бампы, в которых размещаются 3 семейства секступольных линз, компенсирующих натуральный хроматизм, – одно горизонтальное, вокруг которого размещены два вертикальных. Между секступолями каждого семейства линейное преобразование близко к $-I$. В этом же бампе в месте с большой горизонтальной бета-функцией размещается октупольная линза, а на краю ячейки, в бездисперсионном промежутке, устанавливается ахроматическая секступольная линза. Силы всех перечисленных элементов выбираются при условии компенсации натурального хроматизма и получения максимальной большой 6-мерной динамической апертуры.

Расчеты, приведенные ниже, выполнены с помощью трекинга для всей структуры накопителя (18 супер-периодов). Точка наблюдения – середина длинного пустого промежутка. Источниками нелинейного возмущения являются секступольные и октупольные линзы, нелинейный край квадрупольной линзы, кинематическая нелинейность (нарушение параксиальности движения). Все расчеты выполнены в приближении 6-мерного движения, с синхротронными колебаниями в присутствии резонатора основной ВЧ-системы (180 МГц) и резонатора третьей гармоники.

На рис.3.1.4 показана зависимость бетатронных частот от отклонения по энергии частицы. ВЧ-система выключена, синхротронные колебания отсутствуют. Трекинг по 1024 оборотам. Начальные координаты выбираются со смещением по нелинейной дисперсии, т.е. колебания частицы осуществляются с малой бетатронной амплитудой. На реальном накопителе подобное измерение выполняется при помощи вариации частоты обращения (ВЧ-частоты). Подгонка осуществлена полиномом 4 степени. Энергетический акцептанс накопителя (максимальное отклонение по энергии) от –4.5% до +4.3%.

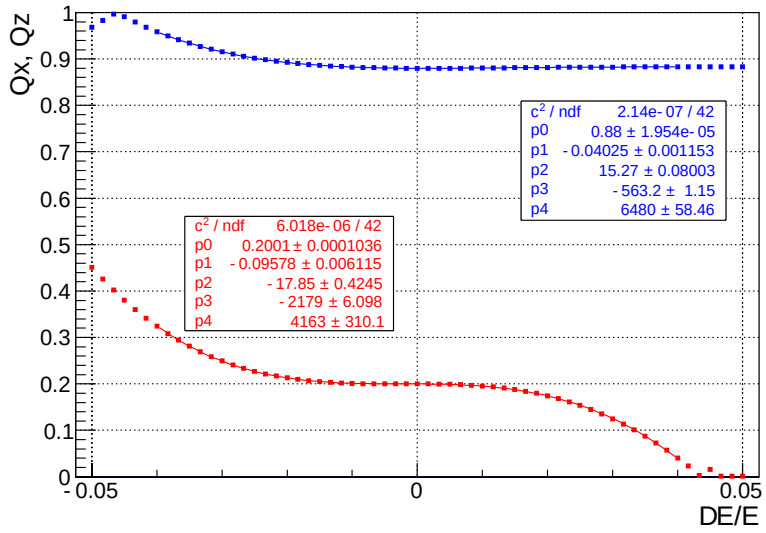

Рисунок 3.1.4. Зависимость бетатронных частот от энергии (красный – горизонтальная бетатронная частота, синий – вертикальная бетатронная частота)

На рис.3.1.5 показана зависимость бетатронных колебаний от отклонения энергии частицы в присутствии синхротронных колебаний (ВЧ включено), при этом начальные координаты частицы равны нулю, что означает рост бетатронной амплитуды с ростом отклонения по энергии. Видно, что из-за синхротронных колебаний хроматические эффекты усредняются и бетатронные частоты фактически не зависят от энергии частицы вплоть до границы области устойчивости (ВЧ-сепаратрисы). Данное моделирование описывает внутрисгустковое рассеяние на большие углы (эффект Тушека) — основной процесс, определяющий время жизни пучка. Изменение энергии частицы на 6.4 % является устойчивым.

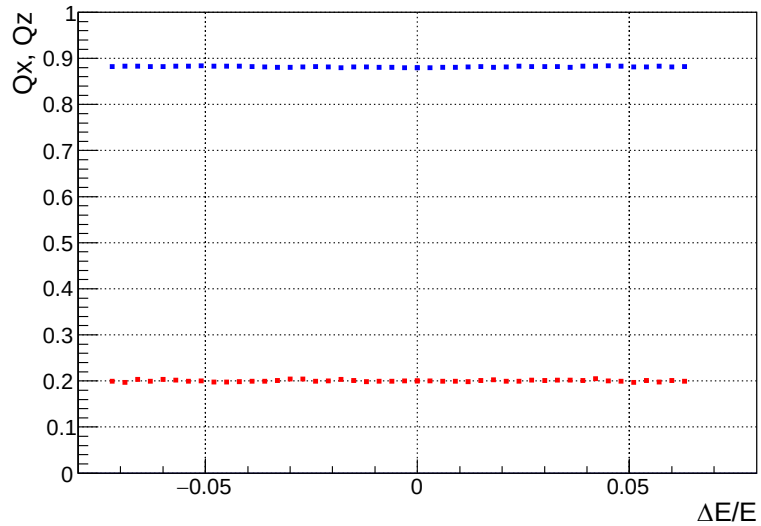

Рисунок 3.1.5. Зависимость бетатронных частот от энергии (красный – горизонтальная бетатронная частота, синий – вертикальная бетатронная частота)

На рис.3.1.6 показана динамическая апертура основного кольца в см и в единицах размера пучка (по горизонтали – 37.5 мкм, по вертикали – 9.0 мкм). Красный цвет соответствует устойчивой частице в течение 1024 оборотов. Черной линией показана апертура при геометрическом ограничении вакуумной камерой диаметром 2.6 см.

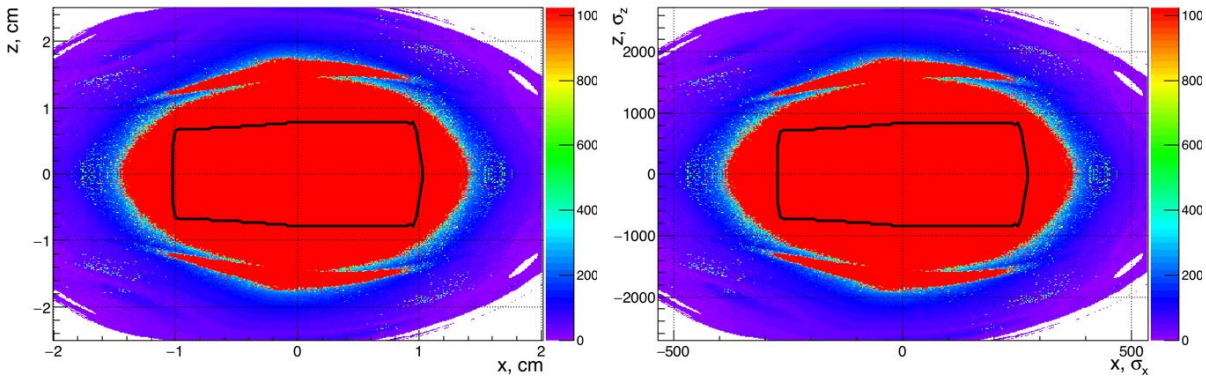

Рисунок 3.1.6. Динамическая апертура в поперечном сечение (черная линия соответствует геометрическому ограничению)

На рис.3.1.7 показана горизонтальная динамическая апертура при смещении энергии частицы. Черная линия также обозначает геометрическое ограничение. Видно, что движение устойчивое вплоть до ВЧ-сепаратрисы.

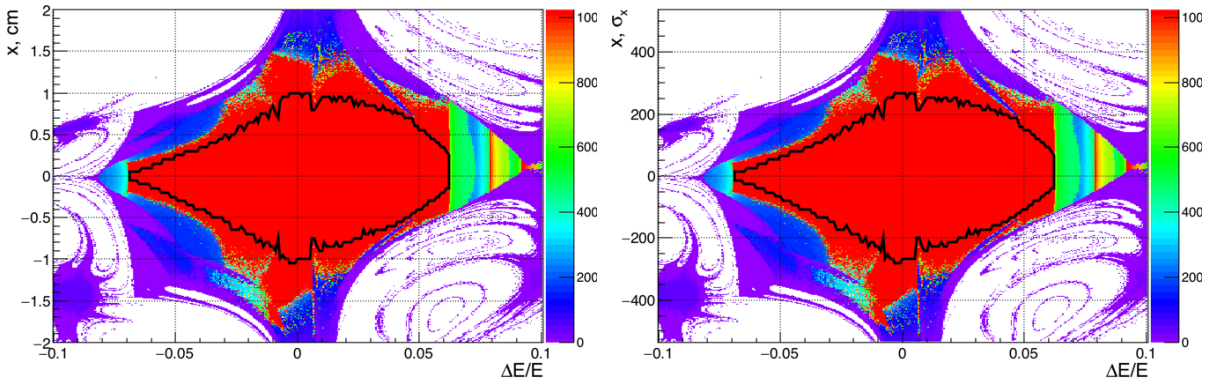

Рисунок 3.1.7. Динамическая апертура в горизонтально-энергетическом сечение (черная линия соответствует геометрическому ограничению)

Внутри-сгустковое рассеивание и время жизни по Тушеку

Кулоновское рассеивание заряженных частиц в накопленных пучках приводит к обмену импульсов между поперечными и продольными колебаниями. Эффект Тушека это есть передача малого поперечного импульса в большой импульс для продольного движения частиц. При столкновении двух частиц и получении достаточно большого продольного отрицательного и положительного импульсов происходит их потеря. Внутри-сгустковое рассеивание из-за многократного Кулоновского рассеивания

приводит к диффузии во всех трёх направлениях, что приводит к увеличению размеров пучка.

Одним из ключевых параметров для современных источников синхротронного излучения является яркость синхротронного излучения. К данному параметру применяются жесткие требования. Согласно работе (K.Kubo. Intrabeam scattering formulas for high energy beams. Physical review special topics – Accelerators and beams 8, 08001, 2005) для получения максимальной яркости необходимо иметь минимальные поперечные размеры пучка в точке излучения и максимальные токи в сгустке.

В таблице 3.1.2 приведены результаты моделирования внутри-сгусткового рассеивания. Для базовой структуры за счет сильного внутри-сгусткового рассеивания происходит заметное ухудшение параметров пучка. Увеличение эмиттанса пучка составляет 2.35 раза, что приводит к уменьшению яркости пучка.

Время жизни по Тушеку составляет не менее 5 часов, что является достаточным для работы установки при инжекции пучка частиц на энергии эксперимента. Напряжение на ВЧ резонаторах 2 MV обеспечивает ВЧ акцептанс 6.9 %, что является достаточным при ограничении энергетического акцептанса нелинейной оптикой кольца 4 %.

Таблица 3.1.2. Параметры базовой структуры с учетом влияния IBS

Параметр	**Значение**
Энергия пучка, ГэВ	3
Периметр, м	477.06
Число частиц	$1.56 \cdot 10^{10}$
Ток сгустка, мА	1.57
Ток пучка, А	0.4
Число сгустков	255
ВЧ частота, МГц	178
ВЧ напряжение, МВ	2
Энергетический акцептанс	0.040
Синхротронная частота	$2.71 \cdot 10^{-3}$
Без учета внутри-сгусткового рассеивания	
Рад. эмиттанс Em_0 (без IBS), м*рад	$1.92 \cdot 10^{-10}$
Энергетический разброс (с IBS)	$6.33 \cdot 10^{-4}$
Продольный размер (без IBS), м	$4.37 \cdot 10^{-3}$
Бетатронная связь	5 %

Внутри-сгустковое рассеивание	
Рад. Эмиттанс Em_ibs, м*рад	$4.29 \cdot 10^{-10}$
Энергетический разброс	$8.68 \cdot 10^{-4}$
Продольный размер, м	0.006
Время жизни по Тушеку, час	5.4

Для получения минимального увеличения эмиттанса пучка (< 20 %) и достаточного времени жизни по Тушеку (~ 5 часов) необходимо уменьшить плотность частиц в сгустке. Это возможно за счет уменьшения тока сгустка, увеличения продольного размера пучка, увеличения бетатронной связи. Одним из наиболее эффективных способов уменьшения плотности частиц является увеличение продольного размера сгустка с помощью ВЧ резонатора с частотой кратной 3 к частоте основного ВЧ резонатора.

Изменение увеличения эмиттанса пучка из-за многократного внутри-сгусткового рассеивания от удлинения пучка с помощью резонатора 3-й гармоники показано на рис.3.1.8. Необходимое минимальное приращение эмиттанса достижимо при удлинении продольного размера пучка более чем в 5 раз. Для обеспечения прироста эмиттанса 10 % и времени жизни по Тушеку 5 часов необходимо пониженное ВЧ напряжение основного резонатора 478 кВ и удлинение сгустка частиц в 5.04 раза.

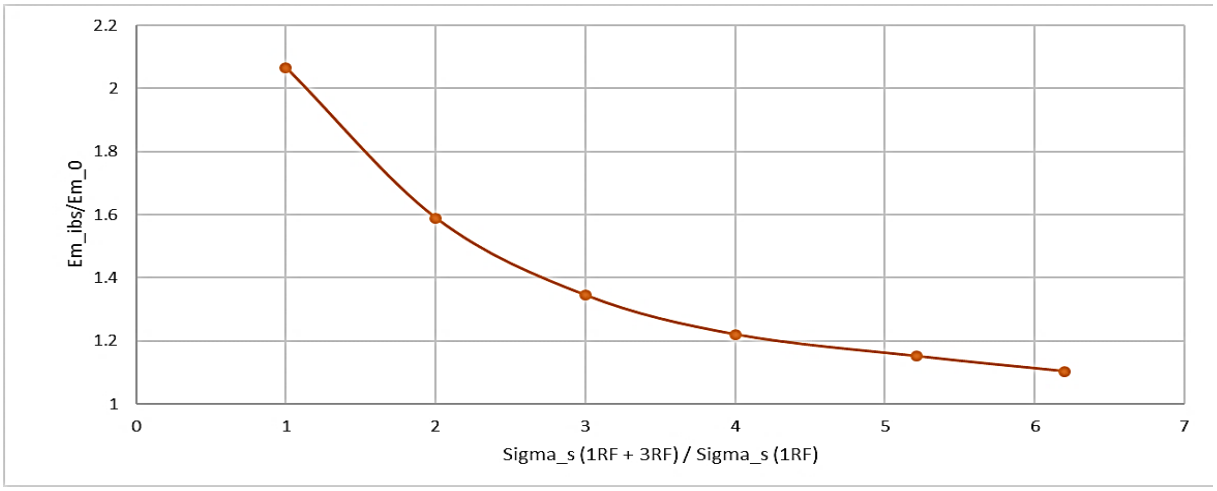

Рисунок 3.1.8. Изменение эмиттанса пучка при удлинении продольного размера пучка за счет резонатора 3-й гармоники при токе пучка 0.4 А

На рис.3.1.9 – рис.3.1.11 представлены результаты влияния внутри-сгусткового рассеивания на параметры пучка для 4 случаев:

1 – Базовые параметры кольца. ВЧ напряжение основного резонатора 2 MV. Энергетическая апертура ограничивается кольцом на уровни 4 %. Резонатор 3й гармоники выключен;

2 – ВЧ напряжение 0.94 МВ основного резонатора обеспечивает энергетический акцептанс равный энергетическому акцептансу кольца 4 %. Резонатор 3й гармоники выключен;

3 – ВЧ напряжение основного резонатора 0.82 МВ создает энергетический акцептанс 3.5 % для обеспечения минимального требуемого времени жизни по Тушеку 5 часов. Резонатор 3й гармоники выключен;

4 – ВЧ напряжение основного резонатора 0.478 МВ, удлинение продольного размера пучка ВЧ резонатором 3-й гармоники 5.04 раза.

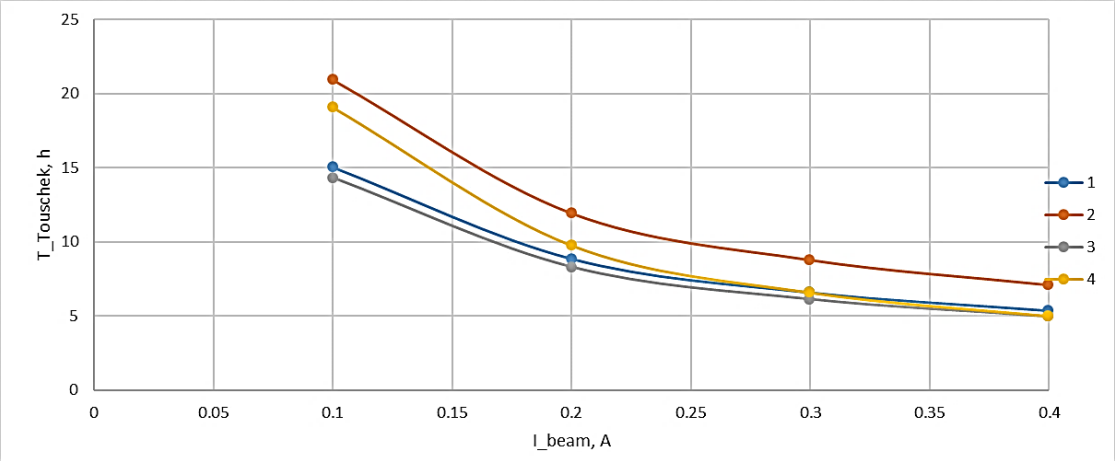

Рисунок 3.1.9. Изменение времени жизни по Тушеку от тока в пучке

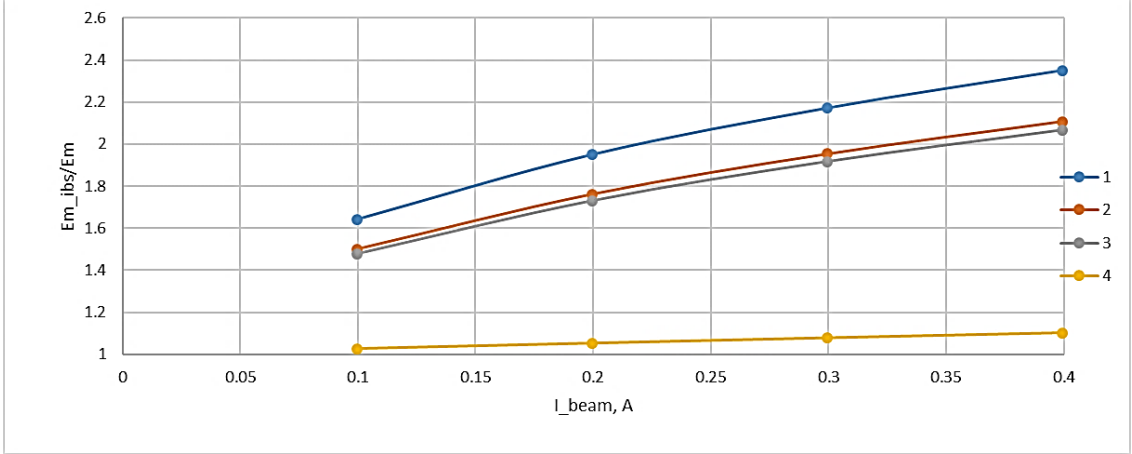

Рисунок 3.1.10. Увеличение эмиттанса пучка от тока в пучке

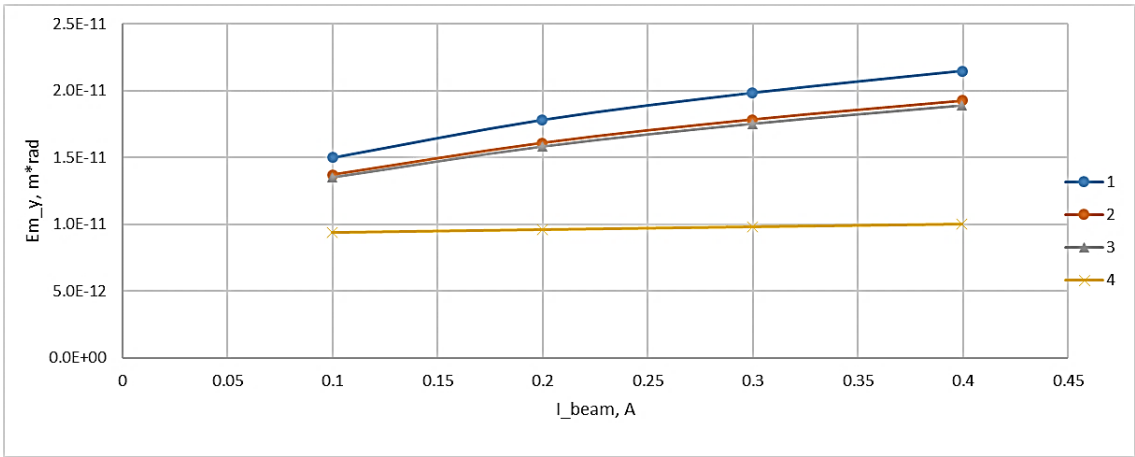

Рисунок 3.1.11. Изменение вертикального эмиттанса пучка от тока в пучке

В таблице 3.1.3 представлены основные характеристики пучка для оптимального значения напряжения основного резонатора и необходимого удлинения ВЧ резонатором 3-й гармоники. Параметры резонаторов обеспечивают при токе 400 мА в 255 сгустках прирост эмиттанса 10 % и время жизни по Тушеку 5 часов.

Таблица 3.1.3. Параметры структуры с включённым резонатором 3й гармоники с учетом влияния IBS

Энергия пучка, МэВ	3000	3000	3000	3000
Периметр, м	477.06	477.06	477.06	477.06
Число частиц	$3.89 \cdot 10^{9}$	$7.79 \cdot 10^{9}$	$1.17 \cdot 10^{9}$	$1.56 \cdot 10^{9}$
Ток пучка, А	0.1	0.2	0.3	0.4
Число сгустков	255	255	255	255
ВЧ частота, МГц	180	180	180	180
ВЧ напряжение, МВ	0.478	0.478	0.478	0.478
ВЧ акцептанс RF	0.019	0.019	0.019	0.019
Синхротронная частота	$1.19 \cdot 10^{-3}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$
Без учета внутри-сгусткового рассеивания				
Эмиттанс (без IBS), м*рад	$1.92 \cdot 10^{-10}$	$1.92 \cdot 10^{-10}$	$1.92 \cdot 10^{-10}$	$1.92 \cdot 10^{-10}$
Энергетический разброс (без IBS)	$6.33 \cdot 10^{-4}$	$6.33 \cdot 10^{-4}$	$6.33 \cdot 10^{-4}$	$6.33 \cdot 10^{-4}$
Продольный размер (без IBS), м	$9.97 \cdot 10^{-3}$	$9.97 \cdot 10^{-3}$	$9.97 \cdot 10^{-3}$	$9.97 \cdot 10^{-3}$
Бетатронная связь	5 %	5 %	5 %	5 %
Внутри-сгустковое рассеивание				
Рад. эмиттанс, м*рад	$1.88 \cdot 10^{-10}$	$1.92 \cdot 10^{-10}$	$1.97 \cdot 10^{-10}$	$2.01 \cdot 10^{-10}$
Энергетический разброс	$3.47 \cdot 10^{-3}$	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$3.48 \cdot 10^{-3}$
Продольный размер, м	0.050	0.050	0.050	0.050
Время жизни по Тушеку с IBS, час	19	10	7	5

Удлинение пучка	5.038	5.038	5.038	5.038

Время жизни

Помимо потерь частиц, связанных с внутрипучковым взаимодействием последних, время жизни пучка определяется с учетом и других физических процессов, приводящих к потере частиц. К таким процессам относятся явления взаимодействия частиц пучка с молекулами остаточного газа:

• упругое рассеяние на ядрах атомов остаточного газа,

• тормозное излучение на ядрах,

• упругое рассеяние на электронах атомов остаточного газа,

• неупругое рассеяние на электронах атомов газа.

Упругое рассеяние на ядрах приводит с спонтанному изменению угла движения частицы, что, в свою очередь, выражается в раскачке бетатронных колебаний и может привести к потере частиц. Общее сечение данного процесса выражается следующим образом:

$$\sigma_{ns} = \frac{4r_e^2 Z(Z+1)}{\gamma^2}\frac{\pi}{2}\frac{\overline{\beta}\beta_0}{a_0^2},$$

где r_e – классический радиус электрона, γ релятивиский фактор (E/mc^2), Z атомный номер остаточного газа, $\overline{\beta}$ среднее по кольцу значение бетатронной функции, β_0 бетатронная функция в точке где вакуумная камера имеет минимальный поперечный размер и a_0 половина минимального поперечного размера вакуумной камеры.

Упругое рассеяние приводит к потерям частиц и уменьшению времени жизни пучка. Время жизни τ определяется как обратная величина скорости потери частиц:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{1}{N}\frac{dN}{dt} = \sigma_e cn,$$

где N число циркулирующих частиц, c скорость частиц, и n плотность остаточного газа. Плотность остаточного газа в зависимости от его давления может быть выражено следующим образом (при T=300 K):

$n[m^{-3}] = 3.217 \times 10^{13} P[nTorr]$ для одноатомных газов (H, C, ...),

$n[m^{-3}] = 6.434 \times 10^{13} P[nTorr]$ для двухатомных молекул (H_2, N_2, CO, ...).

Обычно остаточный газ является смесью различных компонент, в этом случае время жизни рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{\tau} = c\sum_{i,j} n_i \alpha_{ij} \sigma(Z_{ij}),$$

где n_i число молекул i-го газа в единице объема и α_{ij} количество атомов j-го типа в i-том компоненте. Подобные рассуждения могут применяться ко всем четырем типам процессов взаимодействия пучков с молекулами остаточного газа.

Также электроны пучка, проходящие через атом остаточного газа, могут отклоняться электрическим полем ядра и терять энергию через излучение (тормозное излучение, bremsstrahlung). Потери энергии могут быть достаточно большими, чтобы вывести электрон из области стабильной фазы в синхротронных колебаниях, что приведет к его потере. Если в точке столкновения дисперсия ненулевая, также могут возбуждаться бетатронные колебания, которые могут быть достаточно большими и привести к потере электрона в результате его взаимодействия со стенками вакуумной камеры. Тормозное излучение - наиболее значимый эффект остаточного газа, особенно в электронных накопительных кольцах. Полное сечение данного процесса (A. Piwinski. Beam losses and lifetime. CERN 85-19, 1985):

$$\sigma_b = \frac{4r_e^2 Z^2}{137}\frac{4}{3}\ln\frac{183}{Z^{1/3}}\left(\ln\frac{1}{\varepsilon_{\max}} - \frac{5}{8}\right),$$

где $\varepsilon_{max}=\Delta E_{max}/E$ максимальное относительное энергетическое отклонение.

Высокоэнергичные электроны могут терять энергию не только при взаимодействии с ядрами, но и с электронами остаточного газа. Электроны будут теряться, если потеря энергии превышает энергетический акцептанс кольца. Сечение упругого рассеяния на электронах (A. Piwinski. Beam losses and lifetime. CERN 85-19, 1985):

$$\sigma_{es} = \frac{2\pi r_e^2 Z}{\gamma}\frac{1}{\varepsilon_{\max}}.$$

Неупругое рассеяние электронов – процесс, подобный тормозному излучению, но не в электрических полях ядер, а в полях электронов остаточного газа. Сечение процесса (J. Le Duff. Current and current density limitations in the existing electron storage rings. NIM A239 (1985) 83-101):

$$\sigma_{is} = \frac{4r_e^2 Z}{137}\frac{4}{3}\left(\ln\frac{2.5\gamma}{\varepsilon_{\max}} - 1.4\right)\left(\ln\frac{1}{\varepsilon_{\max}} - \frac{5}{8}\right).$$

Общее время жизни может быть оценено с учетом времен, определяемых каждым процессом следующим образом:

$$\frac{1}{\tau_{gas}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_{es}} + \frac{1}{\tau_{is}} + \frac{1}{\tau_{ns}}.$$

Типичная величина давления в вакуумных камерах современных накопительных колец (после надлежащей подготовки или активировании камеры) около 1 нторра и состав газовой смеси близок к следующей: 75%H_2 + 25%CO. Но в данных расчетах будет считаться, что весь остаточный газ соответствует азоту, который считается худшим вариантом. Основные параметры для вычислений вакуумного времени жизни представлены для проекта основного кольца источника СИ ЦКП «СКИФ» представлены в таблице 3.1.4, а результаты оценок представлены в таблице 3.1.5 и на рис.3.1.12.

Таблица 3.1.4. Основные параметры для оценок времени жизни

Энергия	3 ГэВ
Давление остаточного газа	1 нторр
Газовый состав	N_2
Энергетический акцептанс	3%
Максимальное значение β_y	25.45 м
Среднее значение β_y	10.83 м
Минимальная вертикальная апертура (вакуумная камера ондулятора)	8 мм

Таблица 3.1.5. Время жизни для различных процессов

Тормозное излучение, τ_b	72.3 ч
Упругое рассеяние на ядрах, τ_{ns}	8.185 ч
Неупругое рассеяние на электронах, τ_{ie}	200.5 ч
Упругое рассеяние на электронах, τ_{es}	864 ч
Общее, τ_{gas}	7.04 ч

Наиболее значимым эффектом является рассеяние электронов на ядрах, а рассеяние на электронах не имеет сильного влияние на определение вакуумного времени жизни.

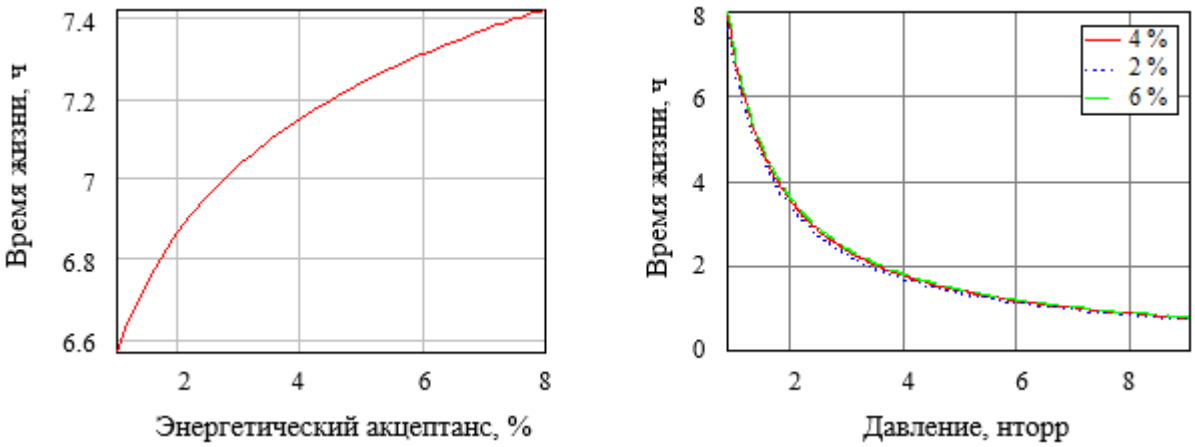

Рисунок 3.1.12. Вакуумное время жизни в зависимости от энергетического акцептанса и давления остаточного газа

3.2. Магнитная система синхротрона

Дипольные магниты с продольным градиентом

В магнитной структуре синхротронного кольца устанавливаются дипольные магниты со ступенчатым изменением магнитного поля вдоль движения пучка. Всего используется два типа магнитов, отличающиеся магнитным полем в одной из 5 секций (каждый магнит имеет 5 секций). Амплитуда магнитного поля в первой секции имеет максимальное значение по сравнению другими секциями, а в каждой последующей ступенчато снижается. Магнитное поле создается при помощи Sm_2Co_{17} постоянных магнитов. Общий вид магнита, состоящего из 5 секций представлен на рис.3.2.1.

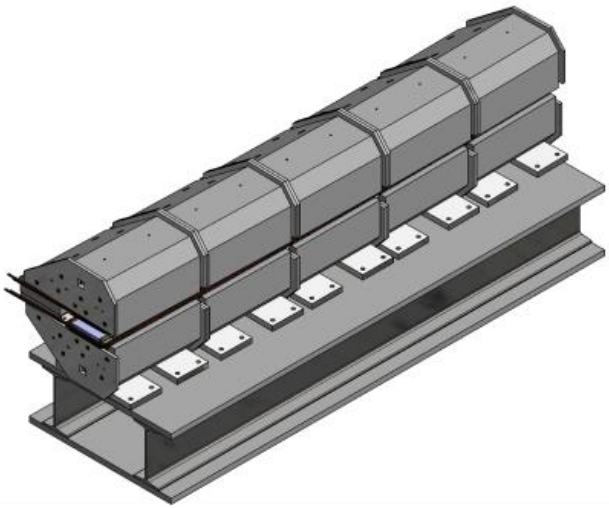

Рисунок 3.2.1. Общий вид дипольного магнита с продольным градиентом

Из рис.3.2.1 видно, что в промежутке между магнитными секциями, размещаются две пластины из металла с μ=1. Толщина каждой из них равна 1 см. С помощью этих же пластин фиксируются полюса в каждой секции магнита и задаётся расстояние между секциями равное 2 см. Кроме того пластины задают расположение секций друг от друга таким образом, чтобы конец первоначальной секции совпадал с началом последующей секции с точностью в несколько десятых миллиметра. Все секции дипольного магнита имеют одинаковую конструкцию (рис. 3.2.2).

Постоянные магниты во всех секциях имеют одинаковую толщину и ширину равную 3 и 6.5 см соответственно. Изменяется только длина магнита в разных секциях, для того, чтобы амплитуды поля в них отличались от соседних секций. Для точной настройки поля, которая возникает из-за разброса магнитов по намагничиванию, в каждой секции магнита имеются ферро-магнитные шунты, позволяющие изменять

величину поля в каждой секции в диапазоне 5%.

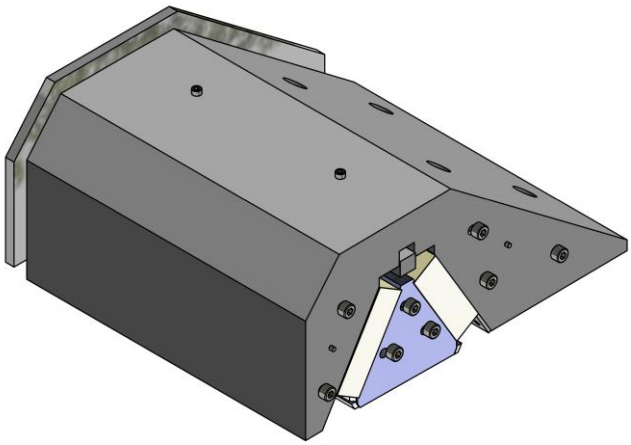

Рисунок 3.2.2. Верхняя половина секции дипольного магнита

Материал Sm2Co17, из которого сделаны постоянные магниты, был выбран потому, что он из всех существующих в настоящее время высоко коэрцитивных магнитов, имеет самый низкий температурный коэффициент Br, равный 0.03% на градус. Чтобы расширить температурный диапазон, при котором амплитуда поля будет оставаться константой, в магните наряду с магнитным шунтом имеется также катушка коррекции, которая позволяет изменять амплитуду поля в пределах +/- 2%. Катушка коррекции состоит из 5 витков, намотанных медной шиной с поперечным сечением 4×4 мм и внутренним отверстием диаметра 2 мм для протока охлаждающей воды.

Основные параметры дипольных магнитов приведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1. Параметры дипольных магнитов с продольным градиентом

Тип	DL1A	DL2B
Количество	36	36
Поле в секторе №1 (Тл)	0.1542	0.1542
Поле в секторе №2 (Тл)	0.2089	0.2089
Поле в секторе №3 (Тл)	0.2661	0.2661
Поле в секторе №4 (Тл)	0.3507	0.3507
Поле в секторе №5 (Тл)	0.5976	0.4832
Эффективная длина сектора (мм)	357.6	357.6
Однородность (dB/B)	10^{-4}	10^{-4}
Радиус однородности (мм)	13	13
Межполюсной зазор (мм)	30	30
Длина магнитопровода в секторе(мм)	330	330

Ширина магнитопровода в секторе (мм)	385	385
Длина общая (мм)	1750	1750
Высота магнита (мм)	405	405
Общая масса линзы (кг)	1250	1250
Ток в катушке коррекции (Ампер)	96	96
Величина коррекции поля катушкой (%)	2.00	1.00
Размер токопровода (мм)	4x4	4x4
Число витков в катушке	5	5

Комбинированные дипольно-квадрупольные магниты

Для улучшения магнитной структуры синхротрона используются два типа дипольно-квадрупольных поворотных магнитов. Конструктивно магнит представляет собой квадрупольную линзу (рис 3.2.3), в которой дипольное поле получается смещением пучка относительно магнитной оси линзы. Ярмо состоит из пластин шихтованного железа, что позволяет использовать один штамп для обоих типов магнитов (поскольку они отличаются лишь длиной).

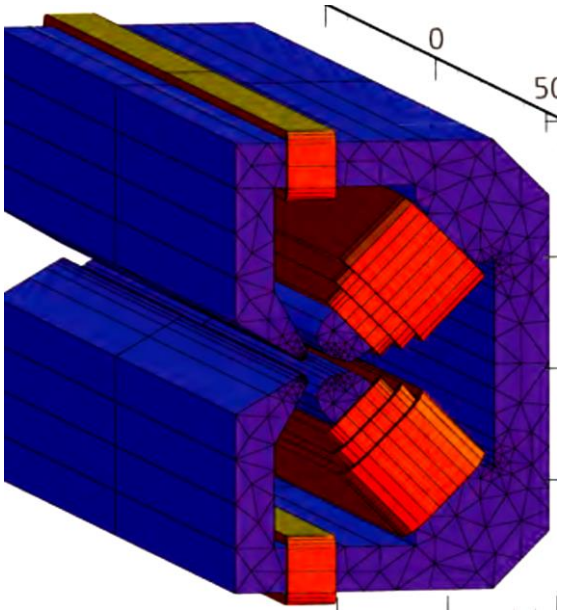

Рисунок 3.2.3. Конструкция комбинированного магнита

Регулировку соотношения дипольной и квадрупольной компонент можно производить поперечным смещением магнита относительно вакуумной камеры.

Ниже в таблице 3.2.2 приведены основные параметры магнитов.

Таблица 3.2.2. Параметры комбинированных дипольно-квадрупольных магнитов

Тип	DQ1B	DQ2C_1
Количество	36	18
Поле (Тл)	0.5052973	0.349125
Градиент (Тл/м)	-18.43	-15.59
Эффективная длина (мм)	1028	400
Однородность (dB/B)	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Радиус однородности (мм)	7	7
Радиус вписанной окружности (мм)	32	32
Длина магнитопровода(мм)	1013	385
Длина общая (мм)	1098	470
Высота магнита (мм)	507.3	507.3
Ширина магнита по магнитопроводу (мм)	756.5	756.5
Общая масса линзы (кг)	2186	936
Ток (Ампер)	268	227
Напряжение питания (Вольт)	13.05	5.52
Мощность (кВт)	3.49	1.25
Число витков в катушке	33	33
Сопротивление линзы (Ом)	0.049	0.024
Индуктивность (мГн)	39.00	15.18
Нагрев воды (гр)	7	7
Расход охлаждающей воды (Л/мин.)	7.15	2.56
Размер токопровода (мм)	9x9	9x9

Квадрупольные линзы

Структура синхротрона представлена десятью типами квадрупольных линз. Они отличаются эффективными магнитными длинами и величинами градиентов магнитного поля, однако имеют одинаковый вписанный радиус. Ярмо для линз предполагается изготавливать из шихтованного железа, что позволит использовать унифицированные пластины для производства железного ярма.

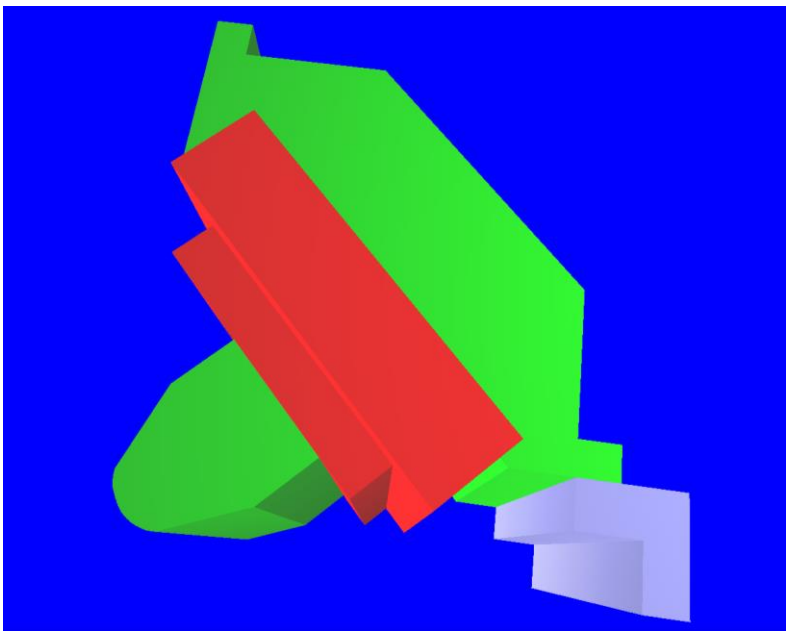

Рисунок 3.2.4. 3D модель 1/8 магнитной системы квадрупольной линзы

Верхняя и нижняя половины линзы соединяются между собой немагнитными проставками, что позволяет свободно размещать каналы для вывода синхротронного излучения (рис.3.2.4, рис.3.2.5).

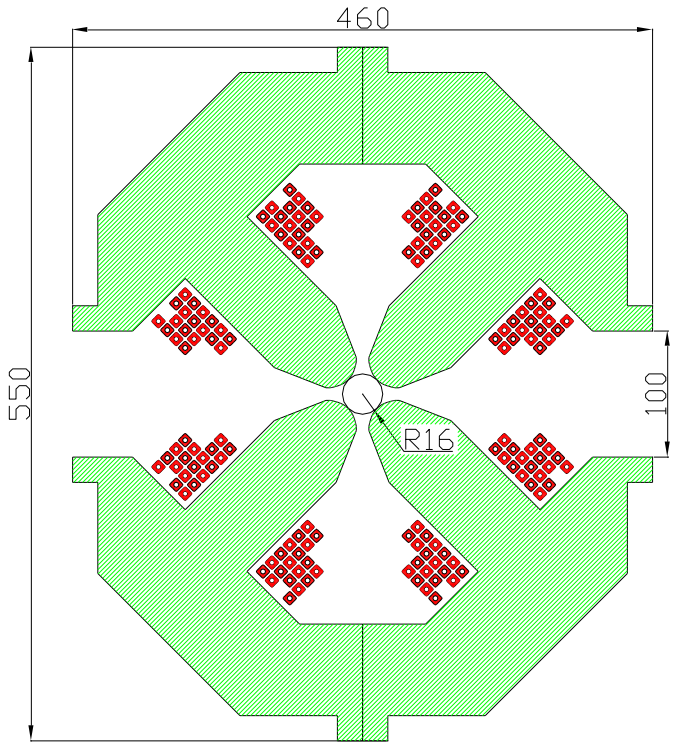

Рисунок 3.2.5. Поперечное сечение квадрупольной линзы

Основные параметры линз приведены в таблице 3.2.3.

Таблица 3.2.3. Параметры квадрупольных магнитов

Тип	QD2A_SH	QD2A_LO	QD3A	QD3B	QF1A_SH	QF1A_LO	QF4A	QF4B	QF6B	QF8B
Количество	18	18	36	36	18	18	36	36	36	36
Градиент (Тл/м)	-27.3	-29.5	-23.7	-28.9	26.2	27.5	26.0	26.0	45.5	44.7
Эффективная длина (мм)	212	212	162	212	295	295	212	212	388	484
Однородность (dB/B)	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$	$5{\cdot}10^{-4}$
Радиус однородности (мм)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Радиус вписанной окружности (мм)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Межшимовой зазор (мм)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Длина магнитопровода(мм)	192	192	142	192	275	275	192	192	368	464
Длина общая (мм)	350	350	300	350	433	433	350	350	526	622
Высота магнита (мм)	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
Ширина магнита по магнитопроводу (мм)	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
Общая масса линзы (кг)	285	285	215	285	401	401	285	285	532	666
Ток (Ампер)	154	167	134	163	148	155	147	147	257	253
Напряжение питания (Вольт)	3.67	3.97	2.81	3.89	4.20	4.41	3.50	3.50	8.63	9.82
Мощность (кВт)	0.57	0.66	0.38	0.64	0.62	0.69	0.52	0.52	2.22	2.48
Число витков в катушке	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Сопротивление линзы (Ом)	0.024	0.024	0.021	0.024	0.028	0.028	0.024	0.024	0.034	0.039
Индуктивность (мГн)	6.80	6.80	5.19	6.80	9.46	9.46	6.80	6.80	12.44	15.51
Нагрев воды (гр)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Расход охлаждающей воды (Л/мин.)	1.16	1.36	0.77	1.30	1.28	1.41	1.06	1.06	4.55	5.08
Размер токопровода (мм)	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8

Секступольные линзы

Структура синхротрона представлена пятью типами секступольных линз. Они отличаются эффективными магнитными длинами и величинами секступольных градиентов магнитного поля, однако имеют одинаковый вписанный радиус. Ярмо для линз предполагается изготавливать из шихтованного железа, что позволит использовать унифицированные пластины для производства железного ярма. Как и в случае квадрупольных линз, в секступольных линзах также присутствует разрыв магнитопровода в горизонтальной плоскости симметрии с внешней стороны кольца синхротрона. Геометрия 1/6 части магнитного ярма была выбрана таким образом, чтобы можно было собрать ярмо целиком из одного типа пластин и трёх немагнитных вставок (рис.3.2.6).

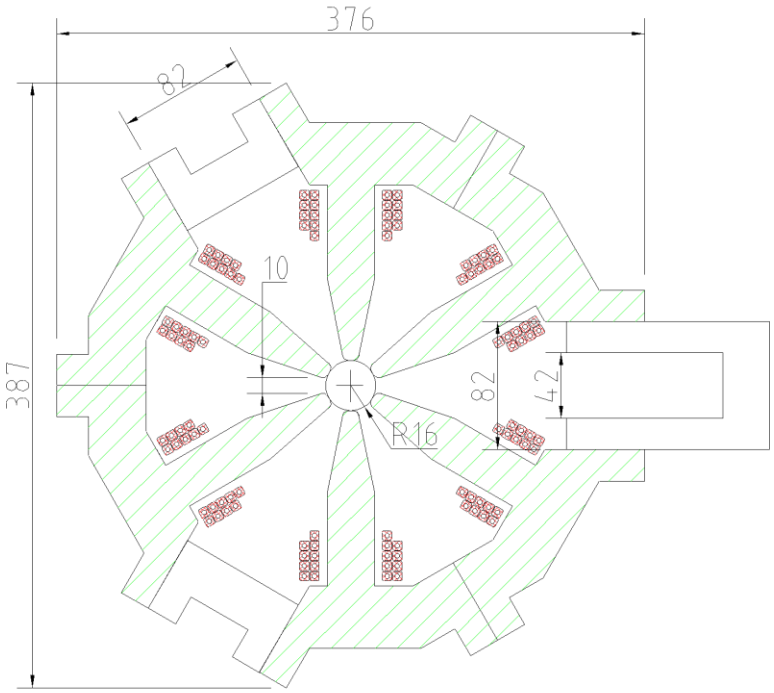

Рисунок 3.2.6. Поперечное сечение секступольной линзы

В группе секступольных линз 2 типа имеют значения секступольных градиентов значительно меньшие в сравнении с остальными. В связи с этим планируется в их конструкции использовать провод без водяного охлаждения, а охлаждение обеспечивать через свободную конвекцию. Параметры секступольных линз представлены в таблице 3.2.4.

Таблица 3.2.4. Параметры секступольных магнитов

Тип	SD1A	SD1B	SF2A	SH1A	SH2B
Количество	36	36	36	36	36
Градиент (Тл/м^2)	- 76.19	-984.77	868.74	132.16	132.16
Эффективная длина (мм)	166	166	200	60	60
Однородность (dB/B)	$1{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$
Радиус однородности (мм)	13	13	13	13	13
Радиус вписанной окружности (мм)	17	17	17	17	17
Межшимовой зазор (мм)	10	10	10	10	10
Длина магнитопровода(мм)	154	154	188	48	48
Длина общая (мм)	229	229	263	123	123
Выстота магнита (мм)	387	387	387	387	387
Ширина магнита по магнитопроводу (мм)	376	376	376	376	376
Общая масса линзы (кг)	67	67	82	23	23
Ток (Ампер)	123	157	129	5	148
Напряжение питания (Вольт)	2.26	2.85	2.68	1.73	4.20
Мощность (кВт)	0.28	0.45	0.35	0.008	0.623
Число витков в катушке	9	9	9	42	42
Сопротивление линзы (Ом)	0.018	0.018	0.021	0.385	0.385
Индуктивность (мГн)	1.54	1.54	1.86	13.12	13.12
Нагрев воды (гр)	7	7	7	0	0
Расход охлаждающей воды (Л/мин)	0.57	0.92	0.71	0.00	0.00
Размер токопровода (мм)	6x6	6x6	6x6	1.8x2.5	1.8x2.5

Октупольные линзы

В синхротроне используется один тип октупольных линз. Ярмо для линз предполагается изготавливать из шихтованного железа. Как и в случае квадрупольных линз, в октупольных линзах также присутствует разрыв магнитопровода в горизонтальной плоскости симметрии. Геометрия 1/8 части магнитного ярма была выбрана таким образом, чтобы можно было собрать ярмо целиком из одного типа пластин, закрепив части на немагнитных пластинах с торцов линзы (рис.3.2.7).

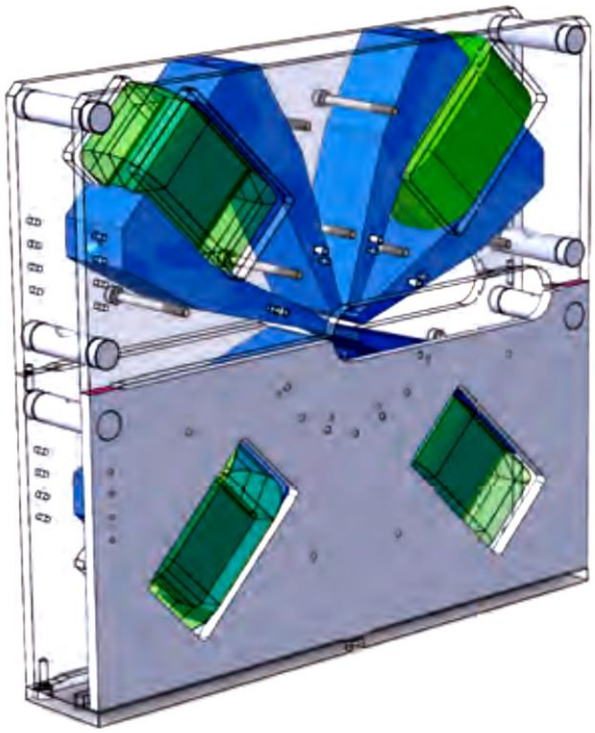

Рисунок 3.2.7. Конструкция октупольной линзы

В конструкции октупольного магнита возбуждающий ток от одной катушки создаёт поле в двух полюсах. Такое расположение катушек (на внешней стороне магнитопровода) позволяет беспрепятственно прокладывать каналы вывода синхротронного излучения через линзу.

Основные параметры линзы представлены в таблице 3.2.5.

Таблица 3.2.5. Параметры октупольной линзы

Тип	F1B
Количество	36
Градиент (Тл/м^3)	- 48485.5
Эффективная длина (мм)	90
Однородность (dB/B)	$5 \cdot 10^{-2}$
Радиус однородности (мм)	13
Радиус вписанной окружности (мм)	18.6
Межшимовой зазор (мм)	11
Длина магнитопровода(мм)	85
Длина общая (мм)	115
Выстота магнита (мм)	430
Ширина магнита по магнитопроводу (мм)	430
Общая масса линзы (кг)	120
Ток (Ампер)	70
Напряжение питания (Вольт)	2.20
Мощность (кВт)	0.15
Число витков в катушке	36
Сопротивление линзы (Ом)	0.031
Нагрев воды (гр)	7
Расход охлаждающей воды (Л/мин.)	0.32
Размер токопровода (мм)	6x6

3.3. Источники питания

Сибирский источник СИ - это комплекс ускорителей и электронно-оптических каналов, включающий в себя большое количество электромагнитных элементов – электромагнитов непрерывного и импульсного действия.

В зависимости от характера работы магнитных элементов требуется создание соответствующих источников питания. Основное кольцо ускорителя включает в себя нескольких десятков электромагнитов разного типа: дипольных магнитов, квадруполей, секступолей и др., работающих с медленно перестраиваемым постоянным магнитным полем. Для электропитания этих магнитов требуется создание прецизионных источников постоянного тока широкого диапазона мощностей – от единиц ватт до сотен киловатт. Маломощные прецизионные источники постоянного тока требуются для питания корректирующих обмоток дипольных магнитов, источники питания мощностью до нескольких десятков киловатт с выходными токами до нескольких сотен ампер, как правило, требуются для питания квадрупольных линз и других электромагнитов, включая магниты со сверхпроводящими обмотками. Для питания электромагнитов основного кольца – дипольных или поворотных магнитов, которые, как правило, соединяются все последовательно или группами, требуются источники постоянного тока мощностью сотни киловатт с выходными токами несколько кило-ампер. Все источники питания постоянного тока обеспечивают долговременную стабильность и уровень пульсаций тока не хуже 100 ppm (10^{-4}), а в некоторых случаях требуемый уровень долговременной стабильности 10 ppm (10^{-5}) и даже лучше.

Бустерный синхротрон, задача которого увеличивать энергию частиц от энергии инжекции 200 МэВ до рабочей энергии основного кольца 3 ГэВ, работает циклически с частотой цикла до 2 Гц. Все электромагниты бустерного синхротрона с быстро перестраиваемым магнитным полем работают с частотой рабочего цикла до 2 Гц. Источники тока, обеспечивающие быструю перестройку магнитного поля по заранее заданному закону, должны обеспечить воспроизведение задания тока и его повторяемость с точностью и стабильностью не хуже 100 ppm (10^{-4}). Схемы источников питания электромагнитов с быстро перестраиваемым магнитным полем, как правило, несколько сложнее схем источников питания электромагнитов с медленно перестраиваемым полем.

Для введения ускоренных в линаке частиц в бустерный синхротрон, а также для перевода ускоренных в бустерном синхротроне пучков в основное кольцо, используются импульсные электронно-оптические каналы. Эти каналы состоят из

импульсных электромагнитных и электростатических элементов, для работы которых необходимы импульсные источники питания. Зачастую, импульсная мощность таких источников питания достигает единиц мегаватт, зарядное напряжение ёмкостных накопителей энергии может достигать нескольких десятков киловольт.

В качестве примеров источников питания рассматриваются источники питания, разработанные в ИЯФ СО РАН для электромагнитных элементов различного назначения, что дает представление об основных конструкциях и требованиях.

Источники питания дипольных магнитов основного кольца на основе многофазных тиристорных выпрямителей

Прецизионные источники питания большой мощности (сотни киловатт) с выходным током несколько кило-Ампер в случае отсутствия требования быстрой перестройки поля электромагнита, как правило, строят на основе многофазных тиристорных выпрямителей (рис.3.3.1).

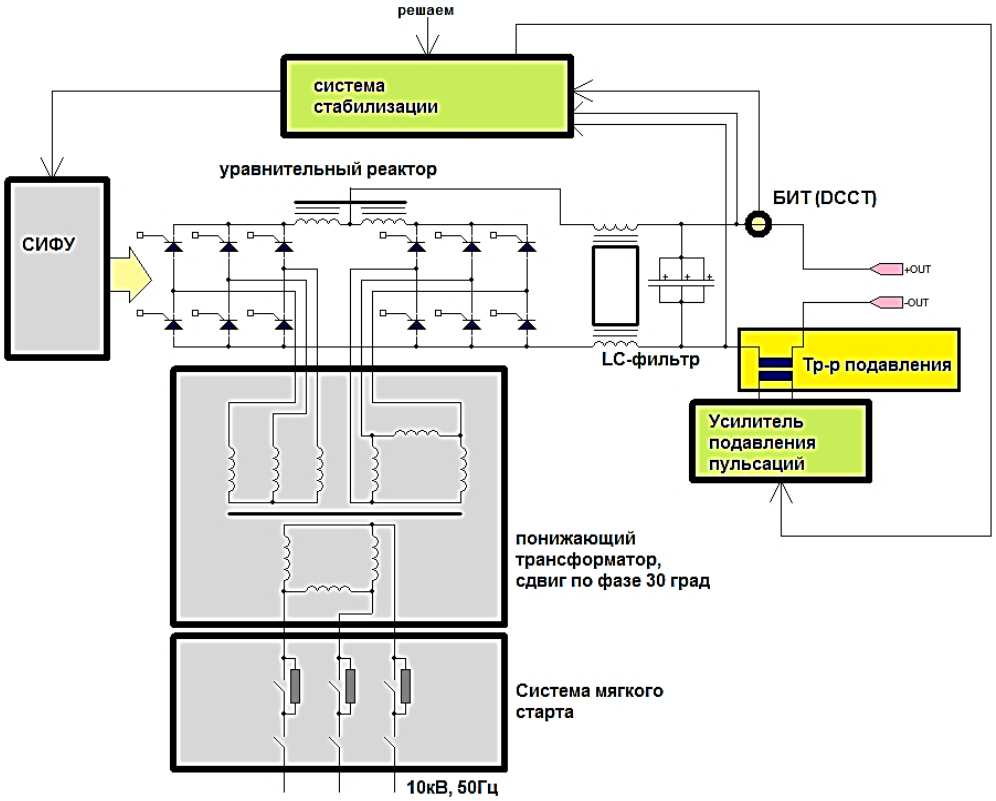

Рисунок 3.3.1. Источник тока электромагнита на основе 12-пульсного тиристорного выпрямителя

Наряду с некоторыми недостатками – относительно низкой частотой преобразования переменного напряжения, вследствие чего для снижения уровня пульсаций выходного тока требуется применение пассивных и активных фильтров,

источники тока на основе тиристорных выпрямителей обладают несомненными достоинствами. К достоинствам можно отнести относительную простоту и дешевизну силовой схемы при построении источников тока большой мощности, большую перегрузочную способность полупроводниковых элементов – тиристоров. Отсутствие высокочастотного преобразования напряжения снижает уровень электромагнитного излучения и повышает уровень электромагнитной совместимости с другим электронным и электротехническим оборудованием. Высокая долговременная стабильность поддержания тока нагрузки достигается за счёт использования системы обратных связей и определяется, главным образом, точностью измерения выходного тока. Выходной ток, который может достигать десятки кило-Ампер, измеряется с помощью Бесконтактных Измерителей Тока (БИТ), обеспечивающих точность измерения не хуже 10 ppm (10^{-5}). Такие бесконтактные измерители тока, или DCCT – Direct Current Current Transformer, разработаны в ИЯФ СО РАН и используются на всех действующих установках ИЯФ СО РАН.

Источники питания дипольных магнитов основного кольца на основе высокочастотных транзисторных преобразователей

Источники тока на основе тиристорных выпрямителей не всегда могут обеспечить необходимый динамический и частотный диапазон, в таких случаях используются многоканальные высокочастотные преобразователи с широтно-импульсным регулированием выходного тока. На рис.3.3.2 приведена функциональная схема разработанного в ИЯФ СО РАН четырёх - квадрантного (реверсивного) источника тока с широким динамическим и частотным диапазоном регулирования тока.

Источник питания на основе высокочастотных транзисторных преобразователей состоит из сетевого понижающего трёхфазного трансформатора с выходным диодным выпрямителем и ёмкостным фильтром и параллельно включённых преобразовательных модулей, работающих на частоте преобразования 10-20 кГц. Понижающий трансформатор обеспечивает гальваническую изоляцию нагрузки от питающей сети и согласует уровни напряжения. Система широтно-импульсного управления преобразовательными модулями обеспечивает работу модулей с фазовым сдвигом таким образом, что частота дискретизации регулятора, а также пульсации выходного тока становятся достаточно высокими. В приведённом примере используется двенадцать однотипных мостовых IGBT-преобразователя, работающих на частоте 10 кГц и имеющие индивидуальную фазу таймирования. Частота дискретизации и частота пульсаций выходного тока в данном случае равна 12*10 кГц=120 кГц, что обеспечивает

высокий уровень подавления пульсации напряжения 300 Гц сетевого выпрямителя.

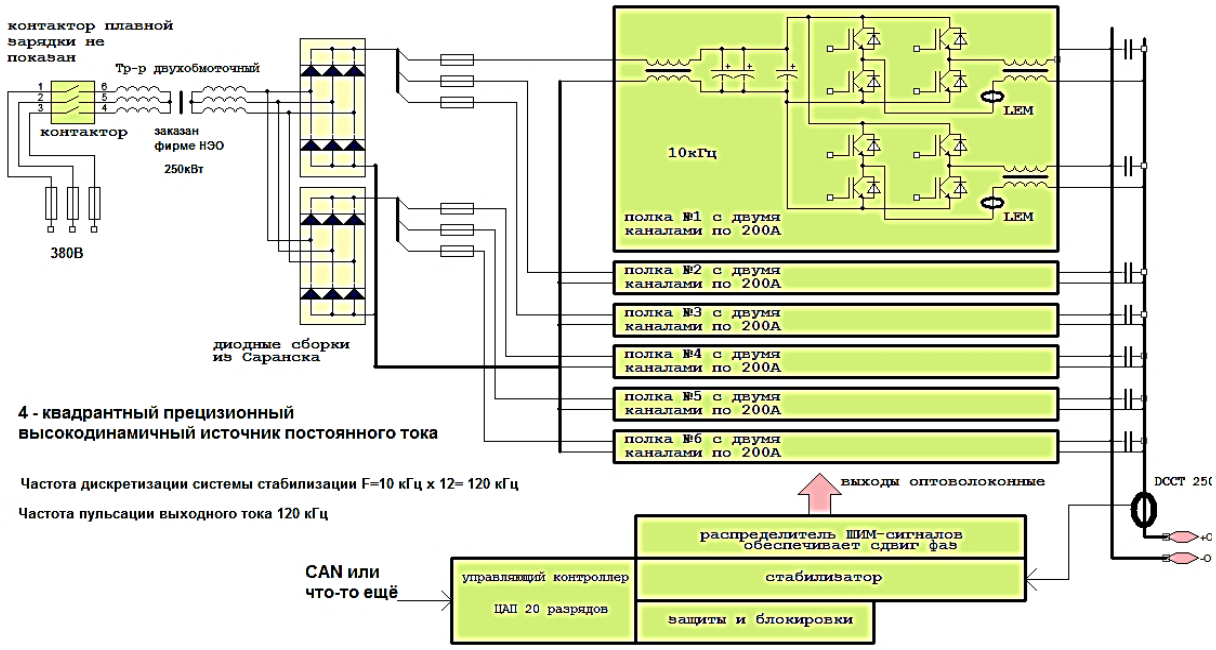

Рисунок 3.3.2. 4-квадрантный источник питания электромагнитов на основе высокочастотных транзисторных преобразователей

Источники питания квадрупольных магнитов

Квадрупольные магниты ускорительно-накопительных комплексов и синхротронов, в отличие от дипольных магнитов, которые включаются последовательно большими группами, требуют индивидуальных источников питания существенно меньшей мощности. Типичный диапазон выходных токов источников питания квадруполей – сотни ампер, выходная мощность, как правило, не превышает нескольких десятков киловатт.

Существует большой опыт разработки, конструирования и длительной эксплуатации источников питания квадрупольных магнитов и других электромагнитных элементов. В качестве базового стандарта для разработки источников питания данного диапазона мощностей в ИЯФ СО РАН применяют стандарт Евромеханика с шириной блоков 19 дюймов.

Все источники питания оснащены прецизионными бесконтактными измерителями тока и контроллерами, обеспечивающими точность поддержания тока и долговременную стабильность на уровне 10-50 ppm (т.е. $10\text{-}50*10^{-6}$).

Ниже на рис.3.3.3 и рис.3.3.4 приведены фотографии некоторых прецизионных источников питания электромагнитов, разработанных в ИЯФ СО РАН.

Рисунок 3.3.3. Прецизионные источники питания электромагнитов с выходным током до 1000 А, сконструированные в стандарте Евромеханика (верхние крышки для наглядности сняты)

Рисунок 3.3.4. Образцы стоек с прецизионными источниками питания электромагнитов

Источники питания корректоров

Каждый дипольный или квадрупольный корректор питается от своего собственного источника тока. Поскольку ток корректора, как правило, не превышает 5-10 А, то целесообразно использование многоканальных источников тока с независимым регулированием выходного тока и общим буферным постоянным питанием. Блоки группами устанавливаются в крейт с собственным источником нерегулируемого постоянного напряжения – «буферным питанием» и многоканальным управляющим контроллером, обеспечивающим для каждого канала задание и измерение тока, связь с компьютером по последовательной линии связи и контроль состояния блокировок и

защит. На рис.3.3.5 представлены источники питания корректирующих обмоток дипольных и квадрупольных магнитов, разработанные и выпускаемые ИЯФ СО РАН.

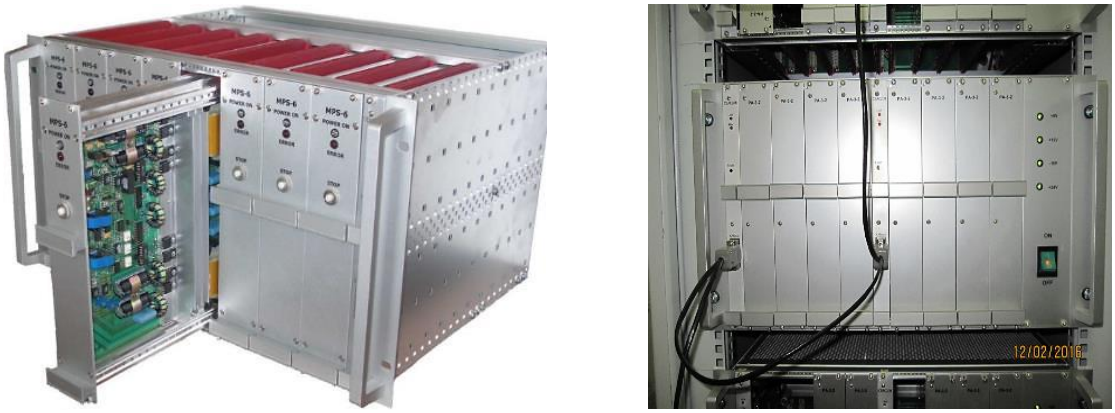

Рисунок 3.3.5. Крейты и источники питания корректоров на ток 6 А (8 каналов) и ток 3 А (16 каналов)

Импульсные источники питания электромагнитов

Для питания импульсных линз каналов транспортировки пучка используют схемы импульсного питания с различными выходными параметрами. В частности, инжекционный комплекс ИЯФ СО РАН оснащён источниками импульсного питания типа ГИД-25 (рис.3.3.6).

Рисунок 3.3.6. Источник импульсного питания производства ИЯФ СО РАН

Источники типа ГИД-25 устанавливаются в стойку, оснащённую системой компьютерного управления и быстродействующими схемам измерения импульсного магнитного поля (рис.3.3.7).

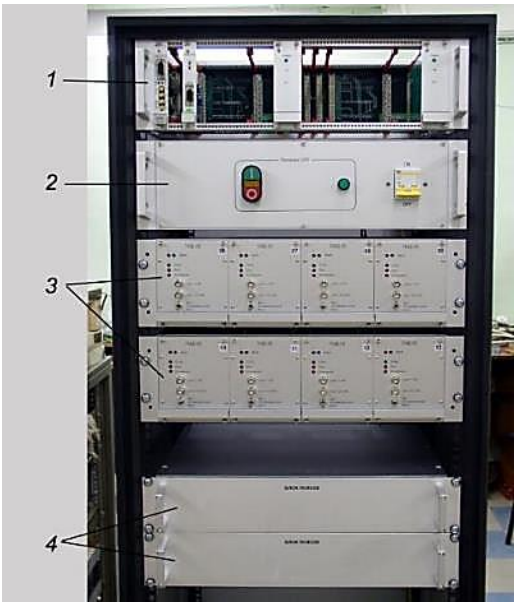

Рисунок 3.3.7. Стойка с группой источников импульсного питания магнитов канала транспортировки инжекционного комплекса ИЯФ СО РАН

Источники питания дипольных магнитов бустерного синхротрона

В отличие от электромагнитов основного кольца, работающих с постоянными или медленно изменяющимися магнитными полями, электромагниты бустерного синхротрона работают в циклическом режиме с частотой цикла до 2 Гц. На рис.3.3.8 показан типичный цикл изменения магнитного поля (красная кривая) дипольных и квадрупольных магнитов синхротрона с быстроменяющимся магнитным полем.

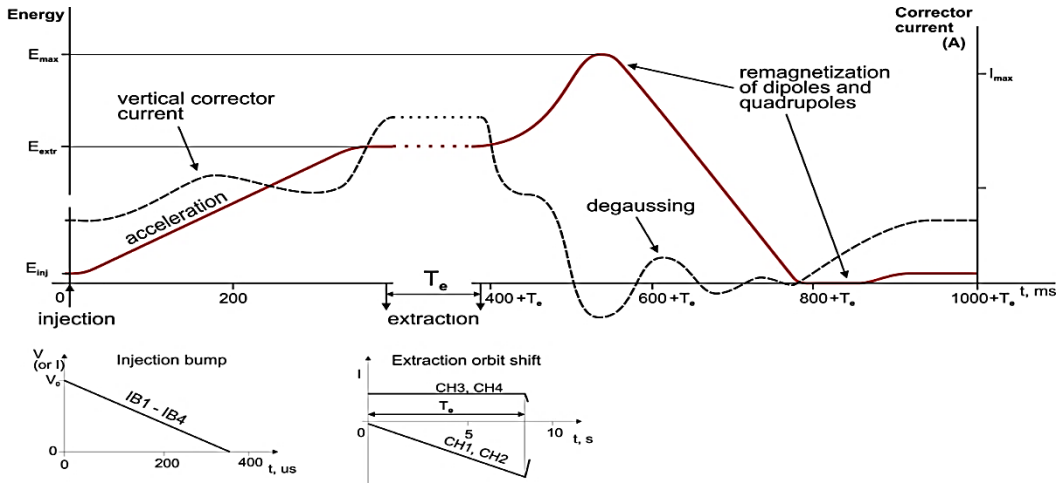

Рисунок 3.3.8. Пример изменения магнитного поля в дипольных и квадрупольных магнитах бустера

Нарастание магнитного поля (acceleration), как правило, происходит по линейному закону. По достижении необходимого уровня магнитного поля происходит выпуск ускоренного в синхротроне пучка в основное кольцо. Далее происходит контролируемый сброс магнитного поля магнита до нуля (remagnetization), после чего

процесс повторяется. В виду большой индуктивности электромагнитов при циклическом режиме работы между источником питания и электромагнитом происходит циркуляция реактивного тока. Во избежание циклического потребления реактивного тока из питающей промышленной сети источники питания синхротронов строятся с использованием промежуточных буферных накопителей энергии. В большинстве случаев используются накопители энергии на основе конденсаторов. На рис.3.3.9 представлена функциональная схема источника питания дипольных магнитов синхротрона с циклически изменяющимся полем.

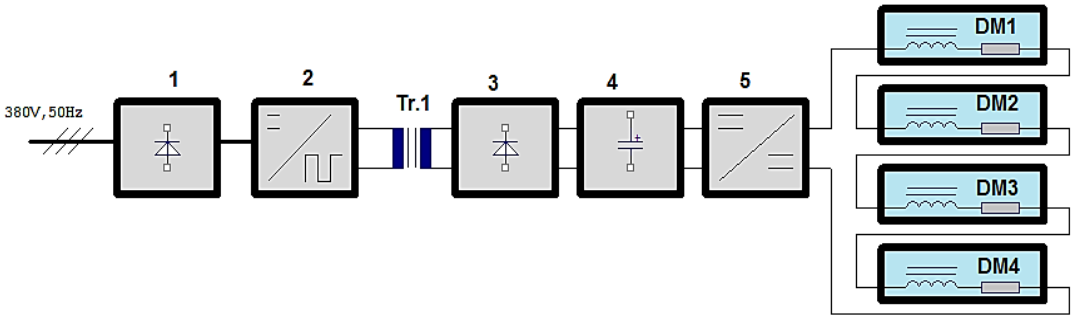

Рисунок 3.3.9. Функциональная схема источника питания дипольных магнитов бустера

На функциональной схеме показано:

- сетевой мостовой диодный выпрямитель с С-фильтром и системой предварительной зарядки С-фильтра;
- мостовой IGBT инвертор, работающий на частоте преобразования 20кГц и выполняющий роль зарядного устройства накопителя;
- мостовой диодный выпрямитель;
- ёмкостной накопитель энергии;
- IGBT-преобразователь с широтно-импульсным управлением;
- DM1….DM4 – дипольные магниты.

В зависимости от параметров магнитов используются как 4-квадрантные, так и 2-квадрантные (не реверсивные) источники питания магнитов.

На рис.3.3.10 представлена функциональная схема 2-квадрантного модульного IGBT-преобразователя, подключённого к ёмкостному накопителю энергии. IGBT - преобразователь в приведённом примере состоит из четырёх параллельно включённых модулей, работающих на одной частоте преобразования, однако, имеющие сдвиг фазы таймирования друг относительно друга. Итоговая частота пульсации выходного тока в четыре раза выше частоты таймирования отдельного модуля, что существенно снижает амплитуду пульсации выходного тока. Вместе с тем частотный диапазон контура

стабилизации выходного тока так же существенно расширяется.

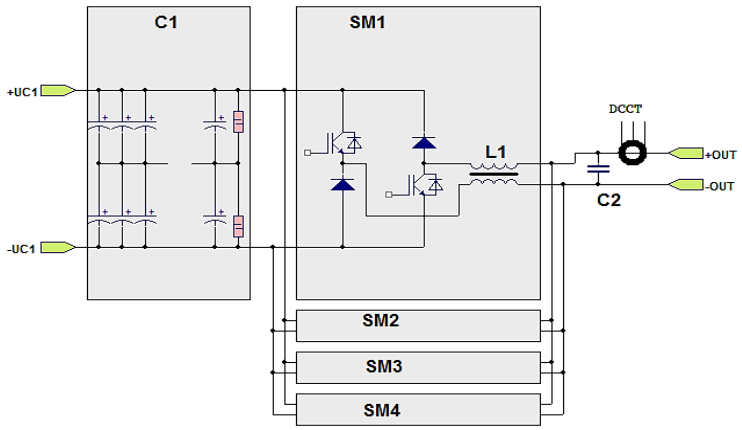

Рисунок 3.3.10. Схема ёмкостного накопителя C1 и регулятора выходного тока – 2-квадрантного преобразователя, состоящего из параллельно включённых модулей SM1-SM4

3.4. Вакуумная система

В данном разделе приведена краткая информация о вакуумной системе линейного ускорителя, бустера-синхротрона и основного накопительного кольца.

Вакуумная система линейного ускорителя

Давление остаточных газов должно быть на уровне 10^{-8} мбар. Для получения высокого вакуума планируется использовать магниторазрядные насосы НМД с быстротой действия 160 л/с по азоту. Магниторазрядные насосы располагаются на расстоянии 5 м друг от друга. Все используемые уплотнения на фланцевых соединениях вакуумной системы – металлические. Коэффициент термического газовыделения со стенок вакуумной камеры не должен превышать $5 \cdot 10^{-10}$ л*мбар/с/см^2. Для измерения уровня вакуума используются датчики давления с холодным катодом (от 10^{-4} до 10^{-10} мбар) и датчики давления Пирани (от 1000 до 10^{-4} мбар) по два каждого типа.

Вакуумная система бустера-синхротрона

В отличии от линейного ускорителя, в котором пучок пролетает единожды, необходимый уровень вакуума в бустере определяется требованием на время жизни пучка, т.е. на время, за которое количество заряженных частиц уменьшится в е раз из-за рассеяния на молекулах остаточного газа. Режим работы бустера такой, что с частотой повторения 2 Гц в него инжектируется новая порция электронов, ускоряется и перепускается в основное кольцо. Для этого достаточно обеспечить время жизни пучка в течение нескольких десятков секунд. Кроме упругих и неупругих рассеяний на атомах и электронах остаточных молекул газа, также влияние на время жизни пучка оказывает ионная неустойчивость. Для того чтобы исключить рассеяние на остаточном газе и ионную неустойчивость среднее динамическое давление должно быть лучше 10^{-8} мбар.

Основным источником газовой нагрузки со стенок вакуумных камер является фотонно-стимулированная десорбция, которая преобладает на порядок и более над термической десорбцией.

Вакуумная система бустера состоит из суперпериодов (каждый из которых включает в себя поворотную секцию и прямолинейный промежуток), изолированных друг от друга цельнометаллическими электропневматическими прямопролетными клапанами Ду 63, с временем срабатывания ~2÷3 с. Высокий вакуум достигается магниторазрядными насосами с быстротой действия 45 л/с по азоту, расположенными на расстоянии 2 м друг от друга. В каждом промежутке располагается по 2 клапана для

форвакуумной откачки, по 1 датчику давления Пирани (от 1000 до 10^{-4} мбар) и по 2 датчики давления с холодным катодом (от 10^{-4} до 10^{-10} мбар). В прямолинейных промежутках также устанавливаются по 1 масс-спектрометру.

Выбор материала для большинства вакуумных камер бустера обуславливается импульсным режимом работы магнитов. Необходимо использовать материалы с низким удельным сопротивлением, например, нержавеющие марки стали аустенитного класса. В таком случае искажение ведущего магнитного поля является незначительным (величина отклонения варьируется в диапазоне от десятых долей до нескольких процентов, для различных магнитов), что легко компенсируется источниками питания магнитов. При изготовлении камер из алюминиевых или медных сплавов искажения магнитных полей будут увеличены в 26 и 41 раз, соответственно. Из этих соображений вакуумную камеру в поворотных магнитах планируется выполнить из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L.

Вакуумная система накопительного кольца

Основная задача вакуумной системы накопительного кольца – обеспечение такого уровня разрежения, чтобы «вакуумное» время жизни пучка составляло не менее 10 часов. Частота рассеяния на молекулах остаточного газа, приводящего к потере релятивистских частиц, определяется из соотношения:

$$f_s = N \cdot \sum_i n_i \sigma_i c = -\frac{\partial N}{\partial t},$$

где N - число релятивистских частиц, n_i - плотность i компоненты атомов остаточного газа, σ_i - сечение взаимодействия с i компонентой атомов остаточного газа, c - скорость света. Соответственно обратная величина “вакуумного” времени жизни пучка в ускорителе определяется суммой частот рассеяния на каждой компоненте остаточного газа:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i n_i \sigma_i c \,.$$

Для электронов с энергиями выше 500 [МэВ] сечение взаимодействия в основном определяется тормозным излучением на атомах остаточного газа. Это однократный процесс, приводящий к потере частицы, если изменение энергии в результате излучения гамма кванта превышает некоторое допустимое значение $\Delta E_{\max}$, составляющее, обычно

0.1 ÷ 4 % от полной энергии частицы. В этом случае, сечения взаимодействия с ядрами и электронами молекул остаточного газа, определяются формулами:

$$\sigma_{in} \approx 4r_e^2 \alpha \cdot Z_i^2 \left[\left(\frac{4}{3}\ln\frac{E}{\Delta E} - \frac{5}{6}\right) \cdot \ln 183 Z_i^{-1/3} + \frac{1}{9}\left(\ln\frac{E}{\Delta E} - 1\right) \right] [\text{м}^2],$$

$$\sigma_{ie} \approx 4 \cdot \alpha \cdot r_e^2 \cdot Z_i \cdot \left\{ \left(\frac{4}{3}\ln\frac{E}{\Delta E} - \frac{5}{6}\right) \cdot \ln\left(1440 \cdot Z_i^{-2/3}\right) + \frac{1}{9}\ln\left(\frac{E}{\Delta E} - 1\right) \right\} [\text{м}^2],$$

где σ_{in}, сечение неупругого рассеяния на ядрах остаточного газа, σ_{ie}, - сечение неупругого рассеяния на электронах остаточного газа, Z_i - заряд ядра атома, E - энергия релятивистской частицы, ΔE - энергетический акцептанс ускорителя, r_e – классический радиус электрона, метр, α - постоянная тонкой структуры.

Для молекулярного азота N_2 (при $\Delta E_{max} = 0.02 \cdot E$) $\sigma_N \approx 2.7 \cdot 10^{-28}$ [м^2], а требование на плотность молекул составит:

$$n(N_2) \le \frac{1}{2 \cdot \sigma_N c \tau} \approx \frac{8 \cdot 10^{18}}{\tau} \text{ [м}^{-3}\text{]}.$$

Таким образом, для обеспечения времени жизни пучка более 10 часов, плотность основных компонентов молекул воздуха не должна превышать 10^{12} м$^{-3}$ (это эквивалентно давлению $5 \cdot 10^{-9}$ торр при комнатной температуре).

Квазиравновесное давление остаточных газов в вакуумных установках определяется равновесием между потоками газовой нагрузки (источниками газа) и потоками молекул, удаляемых системой откачки. Отметим, что внутренняя поверхность вакуумных камер является непрерывным и, чаще всего, определяющим источником газовой нагрузки на протяжении всего периода эксплуатации сверхвысоковакуумных установок. В пучковой камере, например, диаметром 3см количество молекул, химически связанных и физадсорбированных на внутренней поверхности в $310^8 \div 310^9$ раз больше чем в объеме при плотности 10^{12} м$^{-3}$ ($3 \cdot 10^{-9}$ торр). Таким образом, любое воздействие на поверхность, вызывающее испарения (десорбцию) молекул может привести к значительным нагрузкам на систему откачки. В источниках СИ практически вся поверхность вакуумной системы подвержена воздействию интенсивного потока фотонов с энергиями значительно превышающими энергию химических связей. Сечение взаимодействия фотонов СИ с молекулами на 2 – 3 порядка меньше, чем сечение неупругих электрон-молекулярных взаимодействий при энергиях электронов 20÷1000 эВ. Поэтому десорбция газа под действием синхротронного излучения происходит в два этапа: фотоны выбивают с облучаемой поверхности фотоэлектроны (на некоторой

глубине от поверхности), которые, в свою очередь, могут привести к десорбции молекул газа с поверхности вакуумной камеры, причем как при вылете с поверхности, так и при попадании на нее. Кроме того, часть фотонов отражается и рассеивается по всей поверхности вакуумной камеры. В результате, даже в лабораторных экспериментах по изучению десорбции под действием СИ, так или иначе, участвует вся поверхность вакуумной камеры. Это значительно затрудняет интерпретацию и сравнение полученных данных. Однако накопленный опыт позволяет выявить интегральные параметры этого сложного явления, необходимые для расчета и проектирования ускорителей.

Основной характеристикой десорбции под действием фотонов является среднее число молекул десорбированных одним фотоном η[молекула/фотон] - коэффициент фото-стимулированной десорбции, который изменяется по мере очистки (тренировки) поверхности по закону [v1]:

$$\eta = \eta_0 \frac{1}{1+\left(\frac{\Gamma}{\Gamma_{1/2}}\right)^{\varepsilon}} \quad \text{[молекула/фотон]},$$

где η_0 - начальное значение коэффициента десорбции, Γ - фотонная доза [фотон/м], $\Gamma_{1/2}$ - фотонная доза [фотон/м], при которой коэффициент десорбции уменьшается в два раза от начального значения. При фотонных дозах $\Gamma > \Gamma_{1/2}$ коэффициент десорбции убывает по степенному закону с показателем степени ε. По многочисленным экспериментальным данным [Вх-Ву] показатель степени ε изменяется в пределах 0.6÷1.0. Причем большим значениям ε соответствуют большие значения η_0. Начальное значение коэффициента десорбции сильно зависит от материала вакуумной камеры, степени очистки, предыстории (условий и длительности хранения камер до вакуумирования) и варьируется в пределах 0.01÷0.1 H_2 и 0.003÷0.03 для CO в непрогревных системах. Как правило, для получения наиболее низких значений η_0 проводят химическую очистку в ультразвуковых ваннах и предварительный прогрев вакуумных камер непосредственно перед установкой в непрогревную вакуумную систему. Для прогревных систем η_0 варьируется в пределах 0.003÷0.01 для H_2 и 0.0003÷0.003 для CO. Значение дозы $\Gamma_{1/2}$ изменяется в широких пределах 10^{19}÷$3\cdot10^{21}$ [фотон/м]. Здесь также существует достаточно строгая корреляция с η_0: малым

значениям η_0 соответствуют большие значения $\Gamma_{1/2}$. Важно отметить, что соотношения между η_0, ε и $\Gamma_{1/2}$ устроены так, что значение $\eta(\Gamma)$ при дозах $\Gamma > 10^{24}$ [фотон/м] варьируется в весьма малых пределах. Т.е. практически не зависит ни от начальных условий, ни от материала вакуумной камеры.

Следует подчеркнуть, что в циклических ускорителях, функционирующих при комнатной температуре, CO оказывает доминирующее влияние на “вакуумное” время жизни электронных и позитронных пучков. На рис.3.4.1 представлены зависимости $\eta(\Gamma)$ для CO при различных начальных условиях.

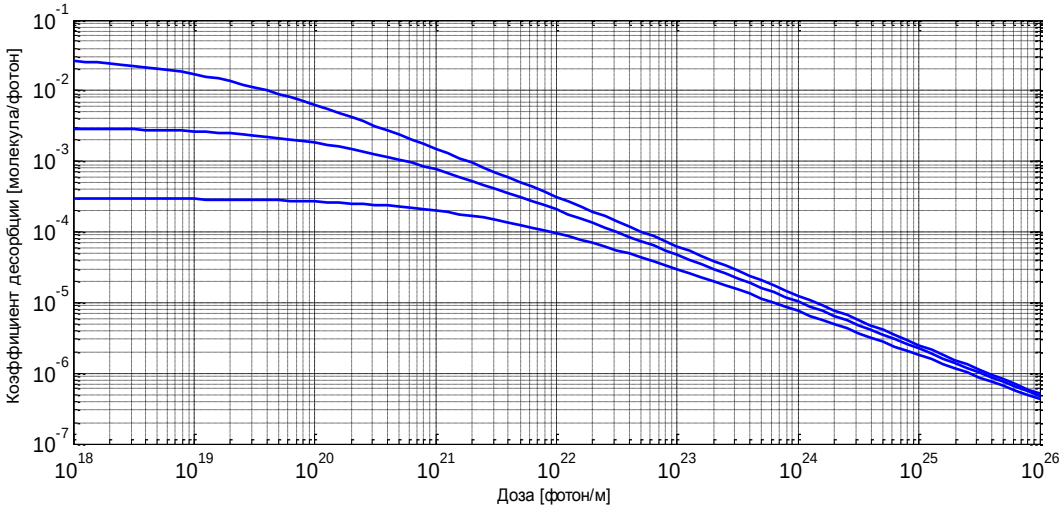

Рисунок 3.4.1. Зависимость $\eta(\Gamma)$ для CO. Начальные условия: 1) η_0=0.03, ε=0.7, $\Gamma_{1/2}$=1.5·10[19]; 2) η_0=0.003, ε=2/3, $\Gamma_{1/2}$=2·10[21]; 3) η_0=0.0003, ε=0.63, $\Gamma_{1/2}$=3·10[21]

В накопителе ЦКП «СКИФ» при номинальном токе 0.4 А, средний поток фотонов, облучающих вакуумную камеру пучка, составит примерно $2\cdot10^{18}$ фотон/с/м. Накопленная доза облучения за полгода непрерывной работы составит $3\cdot10^{25}$. Т.е. за разумное время, соответствующее характерному времени запуска в эксплуатацию подобных установок, коэффициент десорбции по CO снизиться до величины 10^{-6} молекула/фотон (рис.3.4.1).

Наиболее простой способ организации откачки вакуумных камер пучка - применение сосредоточенных насосов (как правило, ионно-геттерных), по возможности равномерно распределенных по периметру ускорителя. Тогда, если допустит постоянство интенсивности десорбции вдоль камеры, распределение давления вдоль камеры между насосами будет параболическим. Если принять, что коэффициент использования насосов составит 30%, то среднее динамическое давление можно оценить из:

$$\hat{P} \approx \frac{\eta(\Gamma) \cdot \Gamma' / K}{9u} L^2 \quad [\text{торр}],$$

где Γ' - фотонный поток на единицу длины камеры пучка [фотон/с/м], L - расстояние между насосами [м]., Здесь $K \approx 3.2 \cdot 10^{19}$ [молекула/(л·торр)] - переводной коэффициент равный количеству молекул в литровом объеме при давлении 1 торр при комнатной температуре, $u \approx 0.12 d^3$ - молекулярная проводимость вакуумной камеры единичной длины [(л/с)·м] для CO, d = 2,6 см– внутренний диаметр вакуумной камеры. В результате находим, что для получения требуемого давления, необходимо расставить сосредоточенные насосы с дистанцией в один метр. Т.е. это должно быть около 460 насосов с скоростью откачки около 50 – 60 л/с, что представляется достаточно дорогостоящим решением.

В последнее время, для обеспечения высокого вакуума в протяженных мало-апертурных камерах, широкое распространение получили нераспыляемые геттеры. Одним из наиболее популярных геттеров, применяемых в настоящее время – тонкопленочное покрытие системы TiZrV. Данный геттер может быть нанесен непосредственно на внутреннюю поверхность вакуумной камеры методом магнетронного распыления. Активация осуществляется внешним прогревом (180º С). В результате, поверхность вакуумной камеры превращается из источника газовыделения в поглотитель. На рис.3.4.2 представлен эффект активации геттера, приводящий к снижению давления, в присутствии СИ, более чем на три порядка.

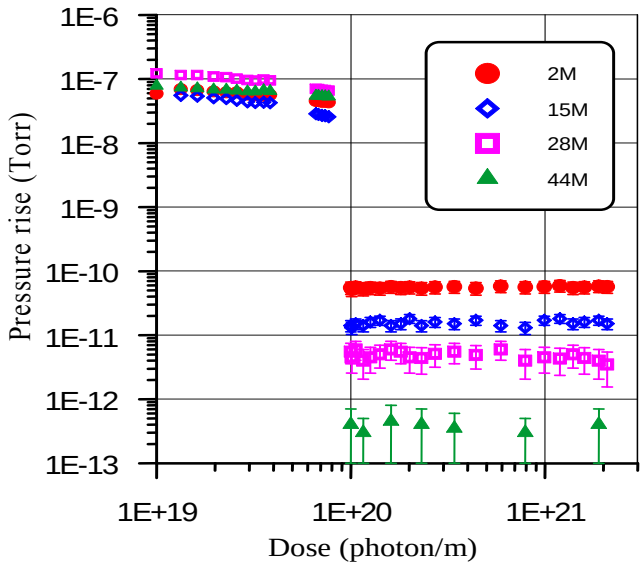

Рисунок 3.4.2. Камера с геттерным покрытием, облучаемая СИ. Эффект активации

Для задач ЦКП «СКИФ» будет использоваться технология напыления пленок TiZrV в мало-апертурных камерах длиной до 6 метров, которая успешно освоена в ИЯФ СО РАН и проведены экспериментальные исследования вакуумных свойств геттерных пленок в присутствии СИ, и было изготовлено 20 камер с геттерным покрытием TiZrV для секций вигглеров-затухателей источника СИ 3-го поколения PETRA III, где они успешно эксплуатируются с 2008-го года.

Геттерные насосы не откачивают инертные газы и насыщенные углеводороды, доминирующим из которых, в вакуумных системах, является метан.

Таблица 3.4.1. Входные параметры для расчета среднего динамического давления метана

Энергия электронов, ГэВ	E	3
Ток пучка, А	I	0.4
Средний радиус траектории, м	R	25
Средний поток СИ , фотон/м/с	Γ'	$2 \cdot 10^{18}$
Начальное значение коэффициента фото-десорбции метана, молекула/фотон	η	10^{-7}
Сечение диссоциации метана при взаимодействии с релятивистскими электронами, m^2	σe	~ $4 \cdot 10^{-22}$
Среднее сечение диссоциации метана при взаимодействии с фотонами СИ, $м^2$*	σph	~10^{-22}
Эффективный коэффициент отражения фотонов СИ под малыми углами	Rph	~0.7

*- измерено на канале СИ ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН

В протяженной камере пучка, без вакуумных насосов, динамическое давление метана будет определяться равновесием между фото-десорбцией метана под действием СИ и «откачкой» метана посредством диссоциации под действием электронного пучка и фотонов СИ:

$$\eta\Gamma' = P \cdot K \left[\sigma_{ph}\Gamma' \frac{\sqrt{wR}}{1-R_{ph}} + \sigma_e \frac{I}{e}\right],$$

где K= 3.2E22 [1/(m^3 ·Torr)] – количество молекул в одном кубометре при давлении 1 торр и температуре 300 K. Расчетное значение динамического давления метана составляет $4 \cdot 10^{-9}$ торр. Соответствующее «вакуумное» время жизни: более 25 часов. Интересно, что фотоны СИ и релятивистские электроны дают примерно одинаковый вклад в «откачку» метана посредством диссоциации. Давление метана, определяемое термическим газовыделением метана, оценивается значением $1E^{-10}$ торр.

Таким образом данное решение заведомо обеспечивает требуемое время жизни пучка сразу после проведения активации геттера.

Концепция вакуумной камеры и тепловой режим

Эффективный и экономически выгодный способ изготовления регулярных камер – экструзия алюминиевого сплава (например, АД31 (PETRA III DWG, KEK…)). Имеет смысл, параллельно камере пучка, изготовить два симметричных (в горизонтальном

плане) канала: один для охлаждения, другой для установки нагревателя (активация геттера in situ). Максимально возможная внутренняя вертикальная апертура камеры в дипольном магните = (межполюсное расстояние в магните) – 2 мм (теплоизоляция и технологический зазор) – 2 мм (двойная толщина стенки вакуумной камеры).

Для конструирования камер вывода СИ должны применяться стандартные решения: сварные камеры из фрезерованных или штампованных половинок, содержащих сосредоточенные охлаждаемые поглотители с окнами для вывода СИ и сосредоточенные комбинированные насосы: магниторазрядный + титановый распылитель (или картридж с нераспыляемым геттером).

Прямолинейные участки предполагается сделать также прогревными. Целесообразность применения геттерного покрытия на отдельных участках будет рассматриваться в рабочем порядке.

Распределенная по камере мощность СИ из дипольных магнитов (при E=3 ГэВ, I=0.4 А) не превышает 1500 Вт/м. Максимальный перепад температуры в сечении камеры, из-за нагрева под действием СИ, оценивается из выражения:

$$\Delta T \approx \frac{P}{\pi \cdot \lambda} \mathrm{Ln}\left(\frac{\gamma L_c}{\sqrt{wR}}\right),$$

где γ – релятивистский фактор, λ [Вт/м/К] – теплопроводность материала камеры, R [м] – радиус траектории, w [м] – внутренняя апертура вакуумной камеры по горизонтали, L_c [м] –характерное расстояние от точки падения СИ до канала охлаждения.

Температурный перепад практически не зависит от сечения камеры:

w [см]	P [Вт]	R [м]	L_c [см]	λ [Вт/м/К]]	ΔT [ºC]
2,6	1500	25	1	190	10

Максимально допустимый перепад температур в сечении камеры (по самым строгим критериям):

$$\Delta T_{\max} \le \frac{2 \cdot \sigma_{-1}(1-\varepsilon)}{\alpha \cdot E} = 56\ ^{\circ}\mathrm{C},$$

где σ_{-1} = 69 МПа – усталостная прочность материала при циклическом симметричном нагружении (5E8 циклов), $\alpha = 23.4 \cdot 10^{-6}$– температурный коэффициент расширения, E = 70 ГПа – модуль Юнга, ε = 0.33 – коэффициент Пуассона.

Наиболее жесткий тепловой режим будет у поглотителей СИ из вигглеров-затухателей, где суммарная мощность СИ составит около 200 кВт. В ИЯФ СО РАН имеется опыт изготовления поглотителей СИ большой мощности (рис.3.4.3 и рис.3.4.4).

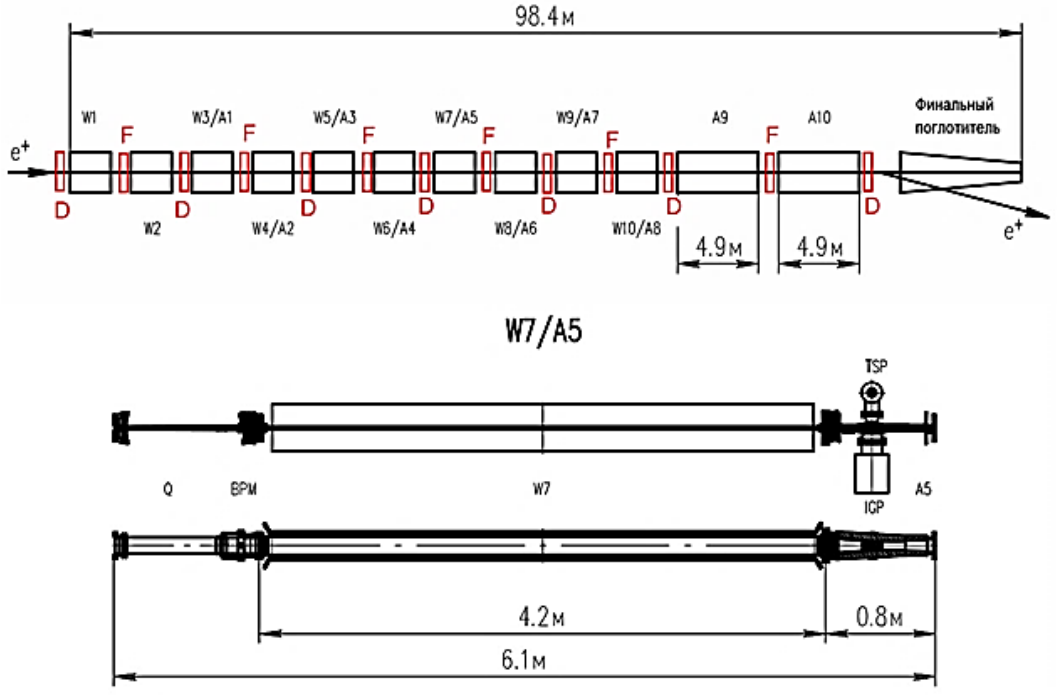

Рисунок 3.4.3. Структурная схема секции затухателей

“W1 – W7: вакуумные камеры вигглеров. Изготовлены из алюминиевого сплава. На внутреннюю поверхность напылён геттер TiZrV

A1 – A7: медные поглотители СИ на 30 кВт

A9, A10: медные поглотители СИ на 90 кВт

Финальный поглотитель: 6-ти метровый медный поглотитель СИ на 150 кВт

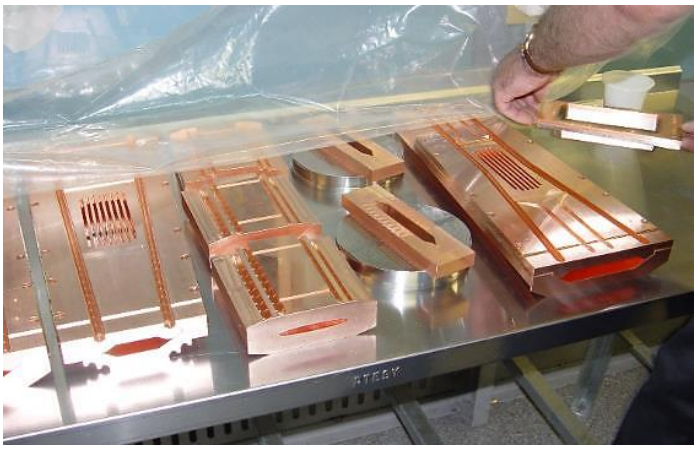

Рисунок 3.4.4. Изготовление поглотителей СИ

3.5. Высокочастотная система основного кольца

ВЧ система основного кольца состоит из ускоряющих резонаторов, генераторов (усилителей мощности – УМов), фидерной системы для передачи ВЧ мощности от УМов в резонаторы и электроники управления / синхронизации.

Технические требования, предъявляемые к ВЧ системе, и, соответственно, ее конфигурация определяются параметрами пучка в накопителе. Потери на синхротронное излучение (СИ) в дипольных магнитах накопительного кольца составляют 0.379 МэВ/оборот, а во вставных устройствах – до 0.623 МэВ/оборот, таким образом полные максимальные потери на СИ составляют около 1 МэВ/оборот. Максимальный ток пучка в накопителе составляет 400 мА. Следовательно, ВЧ система должна обеспечить передачу в пучок до 400 кВт мощности для компенсации радиационных потерь, а для обеспечения стабильного движения сгустков пучка с током 400 мА необходимо сильное демпфирование высших мод (ВМ) резонаторов.

В качестве базового принят вариант ВЧ системы, работающей на частоте 178.47 МГц, что соответствует 285-ой гармонике частоты обращения (при периметре кольца 477 м) и 16-й субгармонике частоты линака. В таблице 3.5.1 приведены основные параметры пучка и ВЧ системы.

Таблица 3.5.1. Основные параметры пучка и высокочастотной системы

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Энергия электронов	E	3	ГэВ
Номинальный ток пучка	I_b	400	мА
Потери на СИ в дипольных магнитах	U_{dipole}	0.379	МэВ/об.
Максимальные потери на СИ во вставных устройствах	U_{ID}	0.623	МэВ/об.
Полные максимальные потери на СИ	$U_{\max}$	1.002	МэВ/об.
Коэффициент уплотнения орбит	α	4.37E-4	
Частота ВЧ системы	f_{rf}	178.469	МГц
Кратность ВЧ	H	286	
Номинальное ускоряющее ВЧ напряжение	V_{rf}	2	МВ
Синхротронная частота (для $V_{rf\ max}$)	f_S	2.323	кГц
Контроль высших мод	Сильное подавление высших мод		
Число резонаторов	N_{cav}	4	
Характеристическое сопротивление 1-го резонатора *)	$R/Q \cdot T^2$	88.6	Ом
Добротность резонатора (70% расчетной)	Q_0	38 500	
Шунтовое сопротивление 1-го резонатора *)	$R_{Sh} \cdot T^2$	3.41	МОм
Коэффициент связи	β	3.73	
Мощность потерь в стенках 1-го резонатора при V_{rf1} = 500 кВ	P_{Cu1}	36.65	кВт
ВЧ мощность на 1 резонатор (включая потери на СИ)	P_1	136.65	кВт
ВЧ мощность усилителя на 1 резонатор (включая потери в фидере 10%)	P_{g1}	150.31	кВт
Число усилителей мощности (УМ)	N_g	4	
Мощность, потребляемая ВЧ системой (при КПД УМ 50%) «от сети»	P_{wall}	1.2	МВт

*) – характеристическое и шунтовое сопротивления резонаторов приведены с учетом коэффициента пролета и «с двойкой в знаменателе» ($R_{Sh} \cdot T^2 = V_{rf1}^2 / 2P_{Cu1}$, где V_{rf1} – амплитуда ускоряющего напряжения на 1-ом резонаторе)

Резонаторы

Резонаторы основного кольца – нормально проводящие, с подавлением высших мод с помощью вакуумных нагрузок.

В ИЯФ СО РАН разработана типовая конструкция нормально проводящих ускоряющих резонаторов УКВ диапазона для использования в составе источников СИ и лазеров на свободных электронах. Резонаторы имеют форму, близкую к цилиндрической, с коническими боковыми стенками (вершина конуса – внутри резонатора, угол раствора конуса 160°). Конические стенки повышают механическую устойчивость конструкции к действию атмосферного давления (сила атмосферного давления, приложенная к боковой стенке ~ 11 тс). Внутренний диаметр цилиндрической обечайки резонатора составляет 1172 мм, длина образующей – 547.5 мм, расстояние между ближайшими основаниями усеченных конусов боковых стенок (длина ускоряющего зазора) – 369 мм. Резонаторы изготовлены из биметалла (8 мм меди и 7 мм нержавеющей стали), получаемого с помощью термодиффузионной сварки в АО «Тамбовский завод «Комсомолец» им. Н.С. Артемова», г. Тамбов.

Резонаторы этого типа успешно работают в составе Уникальной научной установки «Новосибирский лазер на свободных электронах терагерцового диапазона» (УНУ «Новосибирский ЛСЭ»), ускорителя исследовательского центра KAERI (Ю.Корея), специализированного источника СИ Сибирь-2 (Курчатовский институт, г. Москва), накопительного кольца лаборатории DFELL (США). Для ЦКП «СКИФ» могут быть использованы резонаторы, аналогичные резонатору DFELL, который, в отличие от резонаторов УНУ «Новосибирский ЛСЭ», KAERI и источника СИ Сибирь-2, имеет вакуумную ВЧ нагрузку, обеспечивающую сильное подавление высших мод. На рис.3.5.1 изображен так называемый резонатор Duke-2 лаборатории DFELL (второй резонатор, поставленный ИЯФ СО РАН в Duke Free Electron Laser Laboratory).

Рисунок 3.5.1. Фотографии резонатора Duke-2: слева – вид со стороны нагрузки ВМ (торцевой фланец снят), справа – вид снаружи.

На рис.3.5.2 приведен схематический чертеж резонатора Duke-2.

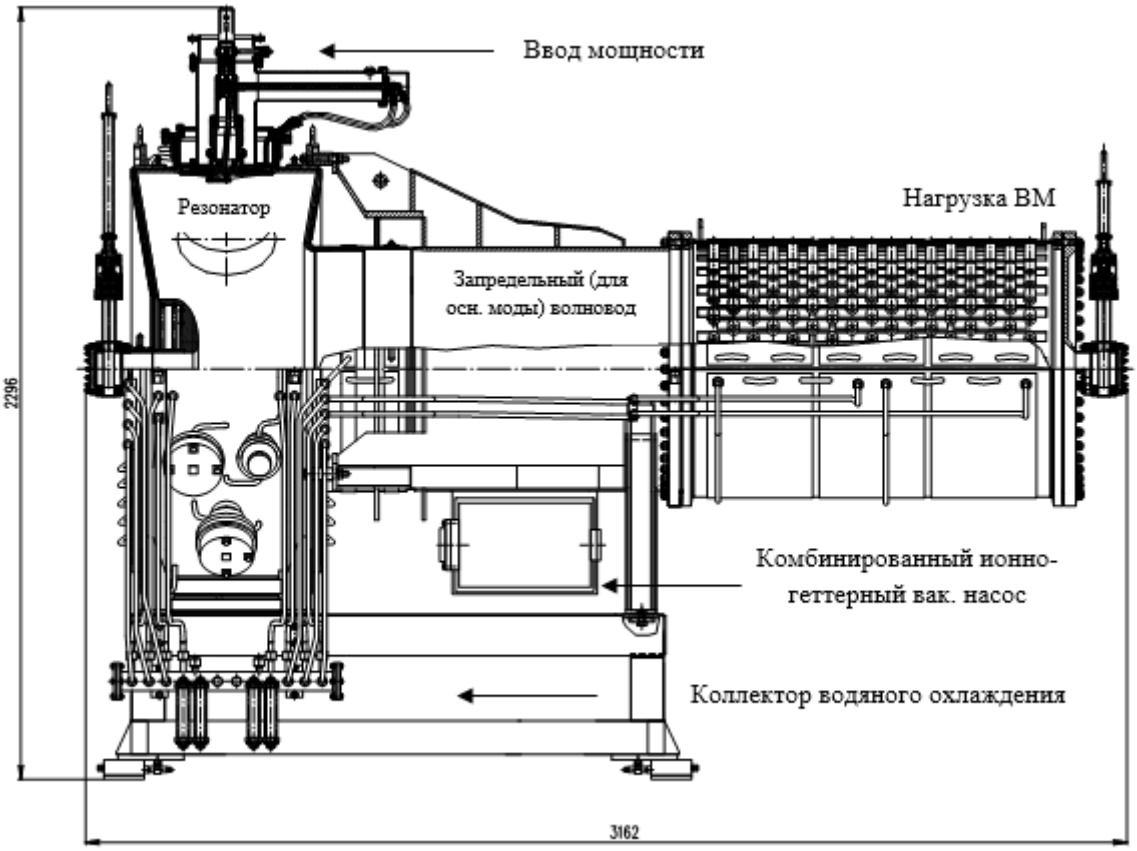

Рисунок 3.5.2. Схематический чертеж резонатора Duke-2

Функционально резонатор состоит из трех частей: резонатор (где происходит взаимодействие ускоряемых частиц с полем основной моды), запредельный (для основной моды) круглый волновод и нагрузка ВМ.

Нагрузка, с помощью которой подавляются высшие моды, состоит из ВЧ-поглотителей и расположена внутри вакуумной камеры, которая в этом месте представляет собой трубу диаметром 700 мм, соединенную с резонатором через отверстие в его торцевой стенке. Эта труба представляет собой круглый запредельный волновод для ускоряющей моды, так что нагрузка, расположенная на достаточном расстоянии, не влияет на величину добротности основной моды. Частота отсечки волновода меньше резонансной частоты наиболее низкочастотной ВМ. Поэтому все ВМ распространяются по трубе к нагрузке и, соответственно, существенно подавляются. На противоположной (относительно нагрузки) торцевой стенке изнутри сделан выступ, размеры которого рассчитаны так, чтобы частота основной моды была равна рабочей. Параметры резонатора на основной моде приведены в таблице 3.5.2.

Таблица 3.5.2. Параметры резонатора Duke-2 (параметры приведены для ускоряющей моды типа E010)

Резонансная частота	f_0	178.5	МГц
Диапазон оперативной перестройки резонансной частоты (2-мя подвижными тюнерами)	Δf_0	320	кГц
Коэффициент пролета	T	0.77	
Характеристическое сопротивление *)	R/Q	149.4	Ом
Характеристическое сопротивление с учетом коэффициента пролета *)	$R/Q \cdot T^2$	88.6	
Собственная добротность (70% расчетной)	Q_0	38 500	
Шунтовое сопротивление *)	R_{Sh}	5.75	МОм
Шунтовое сопротивление с учетом коэффициента пролета *)	$R_{Sh} \cdot T^2$	3.41	МОм
Мощность потерь в стенках при ускоряющем напряжении 500 кВ	P_{Cu}	36.65	кВт
Максимальное испытательное ускоряющее напряжение	$V_{rf\,max}$	770	кВ

*) – характеристическое и шунтовое сопротивления определены «с двойкой в знаменателе», так, что $P = V^2 / 2R$.

Расчетные и измеренные спектры ВМ с нагрузкой и без нее представлены на рис.3.5.3 и рис.3.5.4.

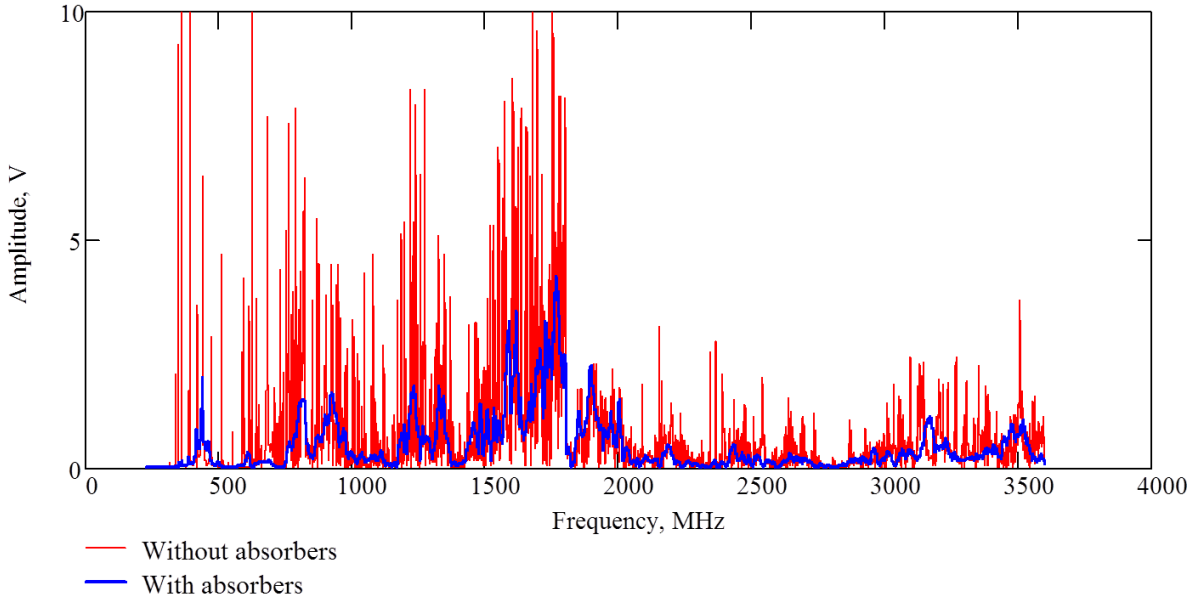

Рисунок 3.5.3. Измеренная АЧХ резонатора Duke-2 без нагрузки (тонкая красная линия) и с нагрузкой (толстая синяя линия) ВМ

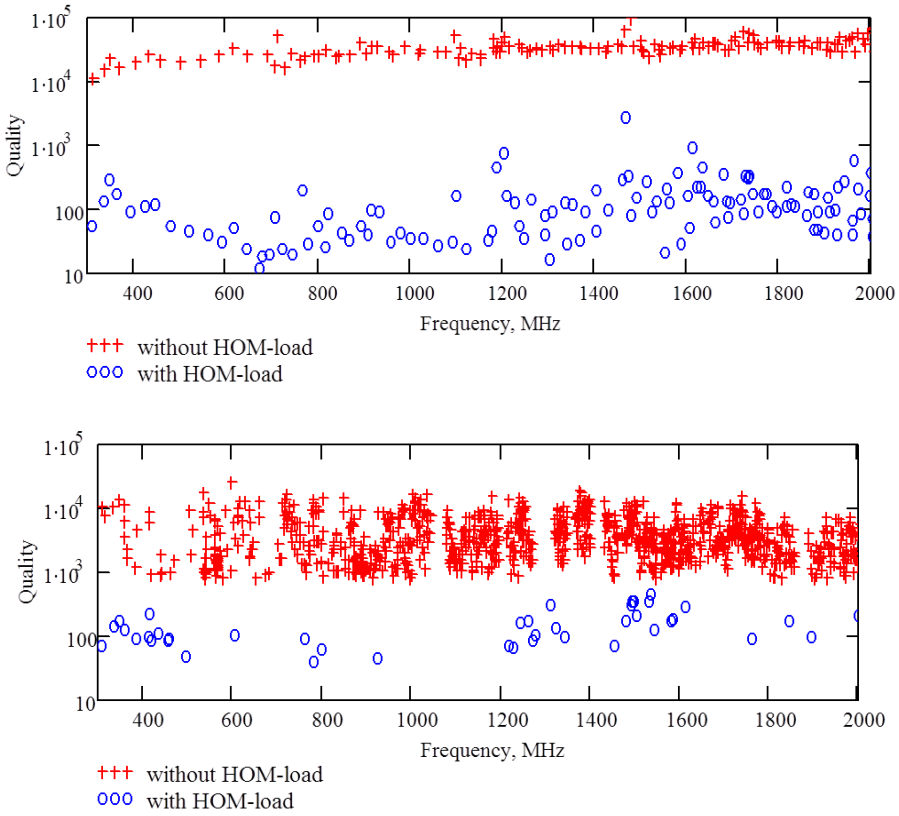

Рисунок 3.5.4. Расчетные (вверху) и измеренные (внизу) значения добротностей ВМ резонатора Duke-2 с нагрузкой (синие овалы) и без нее (красные крестики). При расчетах учитывались только моды E,H_{0mn}, обладающие осевой симметрией; измерялись все детектируемые моды, при этом с нагрузкой ВМ амплитуды многих мод становятся исчезающее малыми

В качестве поглощающего материала для нагрузки высших мод резонатора Duke-2 использовалась выпускаемая в России (г. Фрязино, АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина») проводящая керамика КТ-30. Состав керамики: TiO2 – 30%, А-995 – 70% (Al2O3 – 99.8%, MgO – 0.2%). Конструкция нагрузки и материал поглотителей позволяют прогревать резонатор в сборе до 300-350°С и получить в резонаторе высокий вакуум ($p \sim 10^{-11}$ торр).

В качестве альтернативного материала поглотителей для нагрузки ВМ может рассматриваться керамика ПКМ-35Ж, обладающая, в отличие от КТ-30, не только электрическими, но и магнитными потерями. Производитель ПКМ-35Ж – также АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина».

Для сокращения общей длины ВЧ промежутков в основном кольце ЦКП «СКИФ» возможно объединение двух резонаторов в секцию с общей нагрузкой высших мод между резонаторами, что позволит «сэкономить» ~1.2 м «активной» длины на каждой паре резонаторов. Между резонаторами в паре нет связи на основной моде. Пара резонаторов накопительного кольца схематически показана на рис.3.5.5.

Всего для основного кольца ЦКП «СКИФ» требуется 4 резонатора (2 пары).

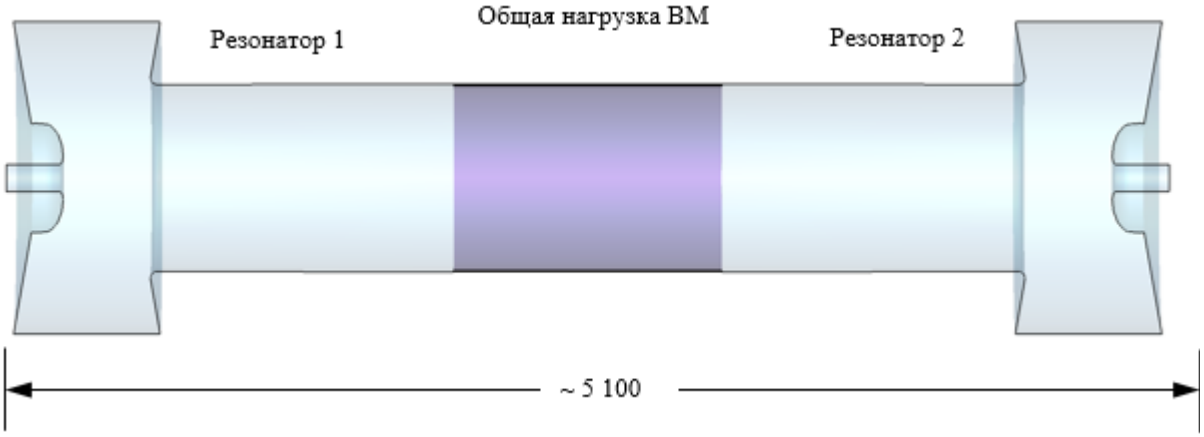

Рисунок 3.5.5. Схема сдвоенного резонатора основного кольца ЦКП «СКИФ»

В нагрузке ВМ резонатора Duke-2 поглощающие элементы были выполнены в виде «стаканчиков» (наружный диаметр – 45 мм, толщина стенки – 6.5 мм, высота – 45 мм), которые через отверстие в «дне» прикручивались к медным пластинам. Современное состояние технологии изготовления керамик в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» позволяет наносить металлизацию на поверхность керамического поглотителя и выполнять спаи металл-керамика. Это позволяет оптимизировать конструкцию нагрузки ВМ для ЦКП «СКИФ». Кроме того, меняя режим термообработки материала поглотителя, можно менять и ВЧ характеристики материала. Для определения материала и конструкции нагрузки необходимо провести соответствующую НИОКР.

Для рассматриваемого варианта ВЧ системы и параметров пучка, приведенных в таблице 4.5.4.2, выполнена оценка устойчивости продольных дипольных колебаний симметричного многосгусткового пучка со всеми заполненными сепаратрисами и током 0.4 А. Для расчета использовался спектр высших мод резонатора Duke-2. Число собственных мод продольных дипольных колебаний многосгусткового пучка равно числу сгустков. Максимальный по всем модам инкремент этих колебаний для несимметричного пучка с некоторыми пустыми сепаратрисами оценивается сверху максимальным инкрементом для симметричного пучка со всеми заполненными сепаратрисами и тем же током одного сгустка. В результате получена оценка максимального инкремента 50 $с^{-1}$, что в 2 раза меньше декремента радиационного затухания 104 $с^{-1}$, что свидетельствует о том, что при использовании резонаторов типа Duke-2 в ЦКП «СКИФ» не возникнет проблем с устойчивостью продольных колебаний пучка.

Усилители мощности

Для питания резонаторов в ИЯФ СО РАН разработана типовая модульная конструкция усилителей мощности на основе электровакуумных усилительных тетродов. Конструкция позволяет собирать генераторы на необходимую мощность из стандартизованных блоков. В мощных выходных каскадах используются как отечественные тетроды ГУ-101А (производства АО «С.Е.Д.-СПб», г. С.-Петербург), так и импортные – TH781 (производства компании THALES, Франция). В усилителях ЦКП «СКИФ» предполагается использовать 2-х-модульные выходные каскады на тетродах ГУ-101А, аналогичные выходным каскадам усилителей БН Сибирь-2 Курчатовского института, предварительные усилительные каскады – твердотельные (транзисторные), аналогичные новым предусилителям ВЧ системы УНУ «Новосибирский ЛСЭ» (см. рис.3.5.6). Транзисторные усилители изготавливаются ООО «НПП Триада-ТВ», г. Новосибирск.

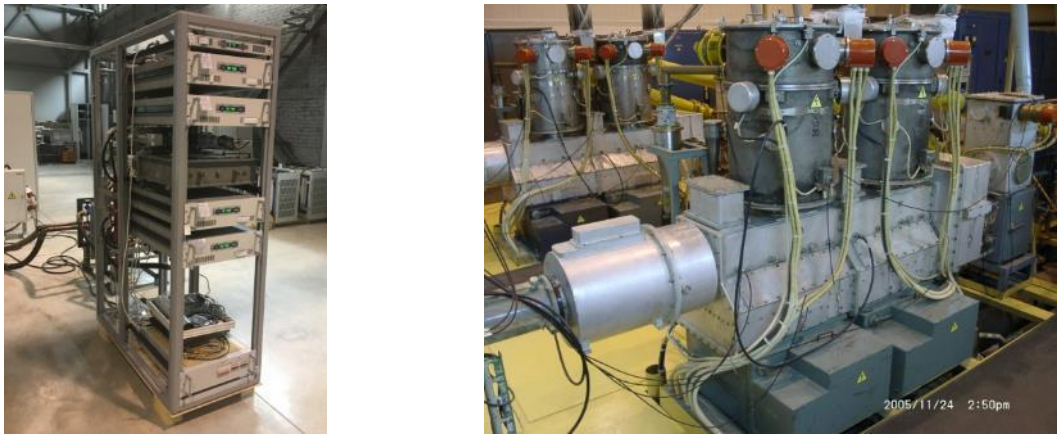

Рисунок 3.5.6. Фотографии усилительных каскадов: слева – новый предварительный твердотельный усилитель 180 МГЦ / 12 кВт для ВЧ системы УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в процессе стендовых испытаний у изготовителя; справа – 2-х-модульные выходные каскады усилителей БН Сибирь-2 Курчатовского института

Выходной ламповый каскад УМ выполнен по схеме с общей сеткой. Конструкция выходных каскадов позволяет (при необходимости) после небольшой доработки перейти с тетродов ГУ-101А на TH781. Система высоковольтного (анодного) и низковольтного питания может быть выполнена таким образом, чтобы можно было работать с обоими типами тетродов после выполнения неоперативных переключений.

Выходная мощность и конфигурация усилителя зависят от числа резонаторов. В таблице 3.5.3 приведены параметры ВЧ системы с различным числом резонаторов.

Таблица 3.5.3. Параметры ВЧ системы с различным числом резонаторов.

Число резонаторов	N_{cav}		3	4
Ускоряющее ВЧ напряжение на 1-ом резонаторе	V_{rf1}	МВ	0.667	0.500
Полное ВЧ напряжение на 1-ом резонаторе	V_{rf1}/T	МВ	0.866	0.649
Мощность потерь в стенках 1-го резонатора	P_{Cu1}	кВт	65.15	36.65
Мощность, передаваемая в пучок в 1-ом резонаторе	P_{b1}	кВт	133.33	100.00
ВЧ мощность на 1 резонатор (включая потери на СИ)	P_1	кВт	198.48	136.65
ВЧ мощность усилителя на 1 резонатор (включая потери в фидере 10%)	P_{g1}	кВт	218.33	150.31
Полная ВЧ мощность	P_{gtot}	МВт	0.65	0.60

Следует принять во внимание приводимые ниже соображения.

При $N_{cav} < 3$ в стенках резонаторов рассеивается недопустимо большая мощность (> 145 кВт).

Опыт эксплуатации УМ в ИЯФ СО РАН показывает, что для увеличения надежности работы УМ и увеличения срока службы ламп не следует превышать следующие значения выходной мощности усилителя в пересчете на 1 лампу: для тетродов ГУ-101А – 100 кВт, для тетродов ТН781 – 150 кВт.

При $N_{cav} = 3$ выходная мощность усилителя, требующаяся для питания 1-го резонатора, составляет 218.33 кВт. Для этого требуется УМ либо с 3-х-модульным выходным каскадом на ГУ-101А, либо с 2-х-модульным на ТН781.

В случае объединения двух резонаторов в секцию с общей нагрузкой целесообразно использовать четное число резонаторов.

При $N_{cav} = 4$ выходная мощность усилителя, требующаяся для питания 1-го резонатора, составляет 150.313 кВт. Такую мощность можно получить от УМ либо с 2-х-модульным выходным каскадом на ГУ-101А или ТН781 (в последнем случае – с большим «недоиспользованием» тетродов).

Исходя из вышеизложенного, оптимальным представляется следующий выбор: $N_g = N_{cav} = 4$, выходной каскад каждого УМ – 2-х-модульный на тетродах ГУ-101А.

На рис.3.5.7 показана конструкция лампового модуля.

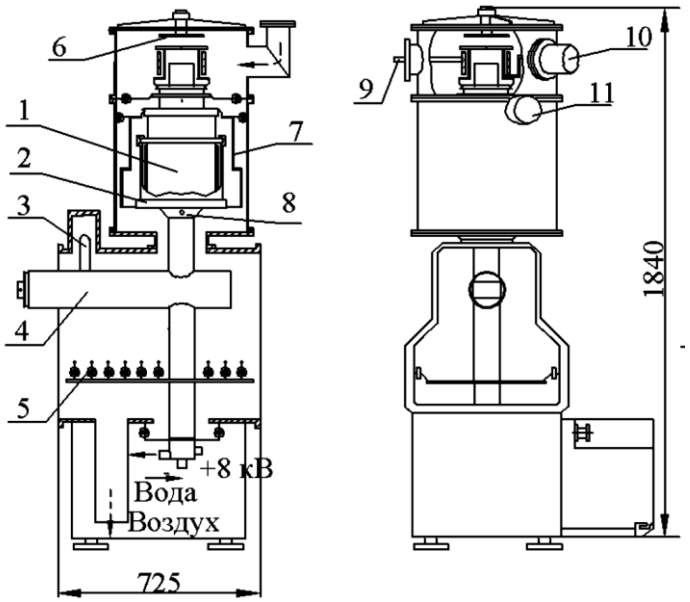

Рисунок 3.5.7. Конструкция лампового модуля

Цифрами обозначены: 1 – тетрод, 2, 3 – дисковая емкость (2) и емкостной шлейф (3), служащие для расширения диапазона рабочих частот модуля, 4 – линия связи, 5 – керамические конденсаторы, замыкающие анодные высокочастотные токи «на землю», 6 – триммер перестройки частоты входного контура, 7 – конструктивный конденсатор, 8 – байонет для подключения водяного охлаждения анода лампы, 9 – коаксиальный ввод ВЧ мощности, 10 – клеммы ввода накала, 11 – клеммы ввода напряжений управляющей и экранной сеток.

На рис.3.5.8. показана упрощенная эквивалентная схема 2-х-модульного каскада. На рис. 3.5.8. вводы мощности в каждый модуль обозначены «RFin», а вывод усиленного сигнала – «RF power output». Подключение накала обозначено «Ukt» и «Uf», вводы постоянных напряжений смещения и экранной сетки «Eg1» и «Eg2» соответственно.

Ламповые модули конструктивно разнесены вдоль общей линией связи на половину рабочей длины волны, а анодные выходные контуры кондуктивно соединены с ней. В такой геометрии для сложения высокочастотных мощностей модулей необходимо противофазное возбуждение ламп. В этом случае ламповые модули можно рассматривать как эквивалентные синфазные источники тока, включенные в одно сечение линии связи с одинаковым высокочастотным напряжением. Противофазное возбуждение модулей может осуществляться либо общей входной ТЕМ линией с подключением к модулям через половину рабочей длины волны, либо раздельным возбуждением входных контуров модулей с соответствующим противофазным сдвигом сигналов. Для настройки рабочей частоты и связи одномодульного или двухмодульного каскадов используются настроечные элементы «Main Tuner» и «Output Coupler».

Конструкция узла связи с нагрузкой («Output Coupler») определяется максимальной мощностью генератора. Для однолампового и двухлампового каскадов с максимальной выходной мощностью 150 и 300 кВт соответственно применяется одна и та же конструкция, в которой переменная емкость зазора регулирует величину коэффициента связи нагрузки с генератором. Конструкция узла настройки частоты («Main Tuner») позволяет использовать этот элемент при любом количестве модулей. Стыковочные узлы всех модулей, элементов настройки и связи с нагрузкой унифицированы. Это позволяет собирать каскады с различным числом модулей.

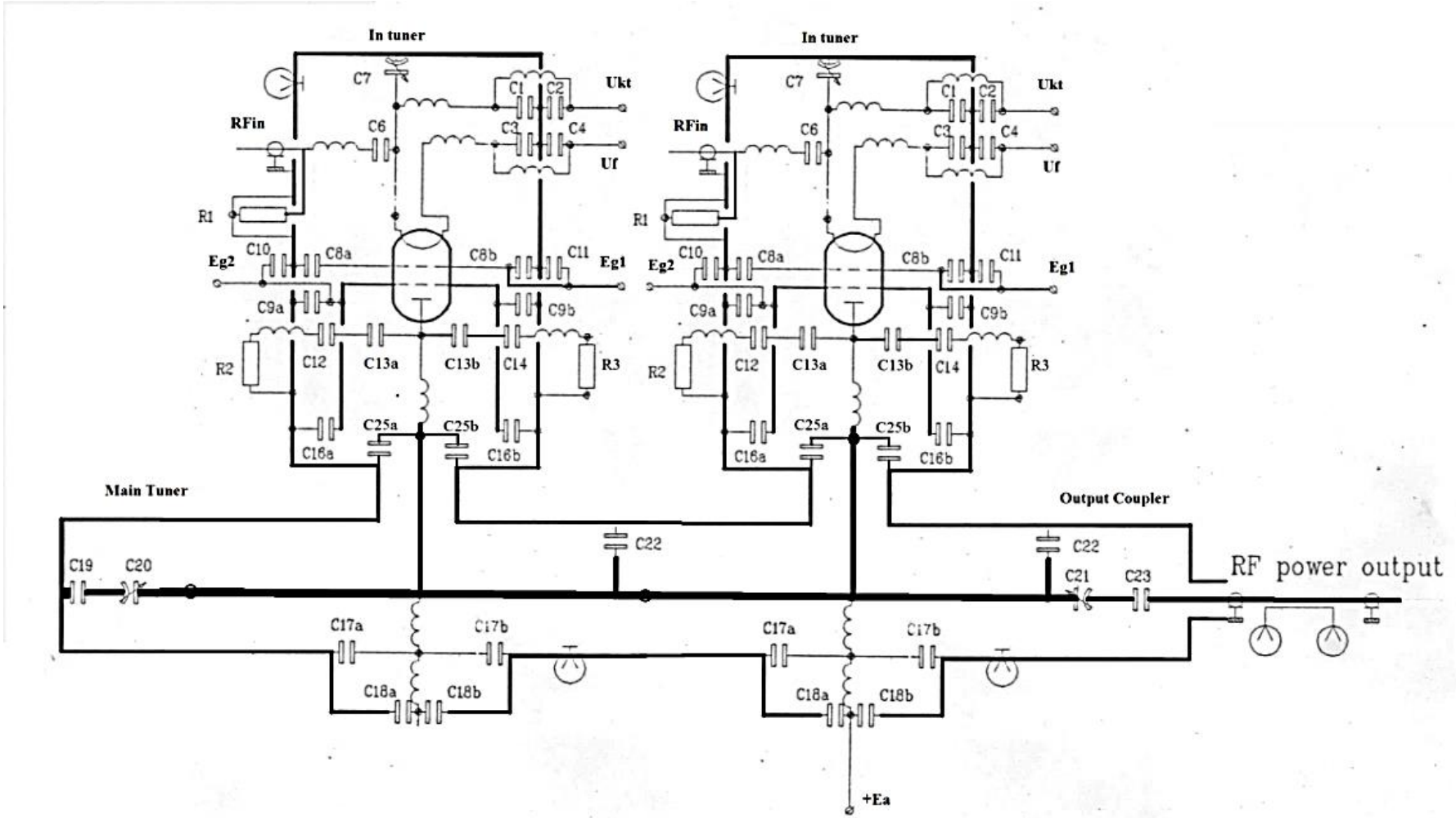

Рисунок 3.5.8. Упрощенная эквивалентная схема 2-х-модульного каскада

Транзисторные усилители выполнены на полевых транзисторах BLF 188 производства NXP Semiconductors N.V., Нидерланды. Четыре транзистора объединяются в усилительную кассету. Мощность от четырёх кассет складывается попарно. Используется схема сложения при помощи квадратурных трёхдецибельных мостов на полосковых линиях. Вход каждого лампового модуля возбуждается от своего усилителя противофазным сигналом, при помощи жёсткой коаксиальной линии типоразмером 3½ дюйма. Требуемый сдвиг фаз обеспечивается на входе каждой четвёрки усилительных кассет. Максимальная выходная мощность каждого усилителя 12 кВт. Питание усилителя – от трёхфазной сети 0.4 кВ. Усилительные кассеты, сумматоры балластные нагрузки смонтированы в стойке размерами 1000×1200×2000 мм (Ш×Г×В) стандарта 19 дюймов.

Для электропитания выходных ламповых каскадов ВЧ усилителей используются две линии сетевого напряжения. Источники низковольтного питания ламп подключены к трёхфазной сети 0.4 кВ. Источники высоковольтного питания подключены к трёхфазной сети 0.69 кВ.

Источники питания конструктивно размещены в шкафах. Шкаф низковольтных источников питания предназначен для питания накалов и сеток тетродов выходных каскадов УМ. В блоках шкафа размещена электроника схемы УБС (управление, блокировка, сигнализация), схема питания переменным током низковольтных источников, регулятор мощности для подъема и снижения напряжения накала в соответствии с рекомендациями производителя ламп, источники питания сеток тетродов, токоизмерительные цепи. Включение низковольтных источников, состояние блокировок, защит отражается на передних панелях блоков УБС. Контроль режимов работы усилителя мощности осуществляется через ЭВМ. Питание шкафа – от трёхфазной сети 0.4 кВ, потребляемая мощность – 20 кВт. Размеры шкафа 1200×800×2100 мм (Ш×Г×В).

Высоковольтный источник предназначен для питания анодов и экранных сеток тетродов выходного каскада и имеет возможность неоперативного переключения выходного напряжения: 10 кВ (при использовании тетродов ТН781) и 9 кВ (при использовании ГУ101А). В источнике предприняты меры для обеспечения безотказной работы ламп при межэлектродных пробоях в соответствии с требованиями завода изготовителя. Время подъёма выходного напряжения от нуля до максимального значения – 8 секунд. Состав источника: тиристорный регулятор сетевого напряжения 3×0.69 кВ, сухой повышающий трансформатор, высоковольтный диодный выпрямитель, выполненный по схеме Ларионова, высоковольтный сухой дроссель, конденсаторы фильтра, схема быстрой защиты. Высоковольтный источник оборудован встроенной вентиляцией, фильтрами

гармоник входного тока, компенсатором реактивной мощности. Подводимая к высоковольтному источнику мощность ~400 кВт. Размеры 3000×800×2100 м (Ш×Г×В).

Электроника управления / синхронизации ВЧ системы

Система управления должна выполнять следующие функции:

Регулирование ускоряющих напряжений резонаторов по амплитуде и фазирование ускоряющих напряжений между собой.

Автоматическая подстройка резонаторов по частоте.

Формирование синхронизирующих сигналов для осуществления точной инжекции сгустков в накопительное кольцо при последовательном заполнении сепаратрис.

Защита мощных элементов ВЧ системы и персонала в нештатных ситуациях.

Система управления может быть выполнена аналогично работающим системам, например, БН Сибирь-2. ВЧ система имеет задающий генератор частоты обращения и умножитель частоты, вырабатывающий сигналы для возбуждения радиочастотных каналов.

Каждый радиочастотный канал ВЧ системы имеет линейный усилитель мощности, питающий один резонатор. Каждый усилитель возбуждается независимо, от регулируемого усилителя, выходной сигнал которого регулируется по амплитуде и фазе. Стабилизация регулирования осуществляется с помощью цепей обратной связи по сигналу с датчика напряжения резонатора.

Следящая система управляет серводвигателем, подстраивающим резонансную частоту резонатора для компенсации дестабилизирующих факторов. Схемы блокировки и защиты осуществляют безопасное штатное включение в рабочий режим, выключение ВЧ системы и защиту мощных элементов и персонала в нештатных ситуациях

Для контроля и управления ВЧ системой в автоматическом режиме по заданной программе имеется необходимое количество каналов ЦАП, АЦП, входных и выходных регистров.

3.6. Диагностическая система

Система генерации синхроимпульсов

Целью системы синхроимпульсов является создание на источнике СИ единой распределенной системы времени. Это достигается тем, что измеряется время распространения импульсов как от опорного генератора до блоков распределения импульсов, так и обратно. Это позволяет вычислить поправки на время распространения сигналов по линиям связи.

Система генерации синхроимпульсов состоит из:

- опорного генератора;
- блоков распределения синхроимпульсов;
- блоков подготовки синхроимпульсов;
- встроенных модулей обработки синхроимпульсов.

Опорный генератор предназначен для выработки сигналов точного времени для всех систем источника СИ: системы питания высокой частоты, системы питания магнитов, диагностики пучка.

Блок распределения синхроимпульсов имеет только оптические интерфейсы и предназначен для распределения и размножения импульсов точного времени. Блок обеспечивает грубую привязку по времени с дискретностью порядка 8 нс.

Блок подготовки синхроимпульсов предназначен для локальной генерации синхроимпульсов, для локальной выработки электрических импульсов для аппаратуры, не предназначенной для работы с оптическим интерфейсом. Дискретность 10 пс.

Встроенный модуль обработки синхроимпульсов (таблица 3.6.1) выполняет функции аналогичные блоку подготовки синхроимпульсов, но предназначен для встраивания в аппаратуру.

Таблица 3.6.1. Временные дискретности модуля обработки синхроимпульсов

Параметр	Значение
Дискретность опорного генератора	8 нс
Дискретность блока распределения синхроимпульсов	8 нс
Дискретность блока подготовки	10 пс
Дискретность встроенного модуля	10 пс
Джиттер	10 пс
Интерфейс	Оптический

Диагностика пучка в линейном ускорителе (линаке) и в каналах линак-бустер, бустер-синхротрон

Диагностика пучка в линаке, в каналах линак-бустер и бустер-синхротрон включает в себя оптическую диагностику и систему измерения положения пучка на основе электростатических датчиков положения пучка (или пикапов). Данная диагностика должна измерять траекторию пучка после каждого “выстрела” (пролета пучка).

В качестве датчиков положения пучка предлагается использовать полосковые датчики. Аналогичные датчики были разработаны в ИЯФ СО РАН для канала перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4 (рис.3.6.1). Электроды пикапа представляют собой короткозамкнутые на одном конце 50-омные полосковые линии. В качестве вакуумных вводов использованы вариваемые вакуумные вводы N-типа.

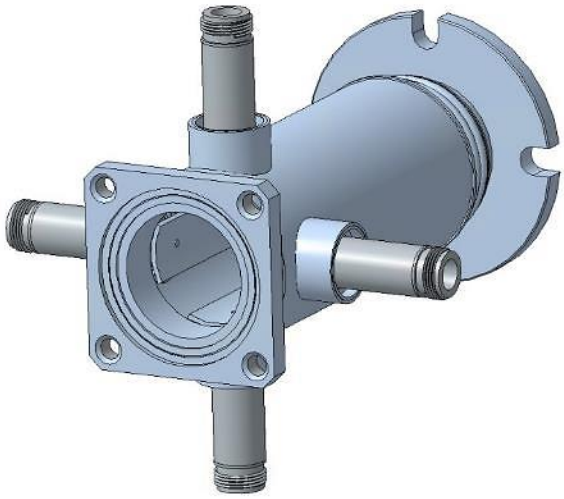

Рисунок 3.6.1. Полосковый датчик положения пучка

В ИЯФ СО РАН разработана также электроника системы измерения положения пучка, позволяющая измерять положение пучка от каждого “выстрела” с точностью порядка 10-20 микрометров, что является вполне достаточным для настройки оптимальных параметров инжектора. На рис.3.6.2 приведена блок-схема блока электроники, работающего с одним пикапом.

Из сигнала с пикапа выделяется компонента частотой около 140 МГц, далее сигнал преобразуется в цифровой вид и обрабатывается уже в цифровом виде. Цифровая обработка включает в себя нахождение интеграла спектра сигнала. Для уменьшения погрешности измерений, возникающей главным образом из-за неодинаковости и нестабильности коэффициентов передач каналов, в блоке использован калибровочный импульсный сигнал, который через направленный ответвитель одновременно подаётся на входы всех 4-х

каналов. Один или несколько калибровочных импульсов длительностью ~2 нс подаются через некоторое время после пролёта пучка (~100 мкс).

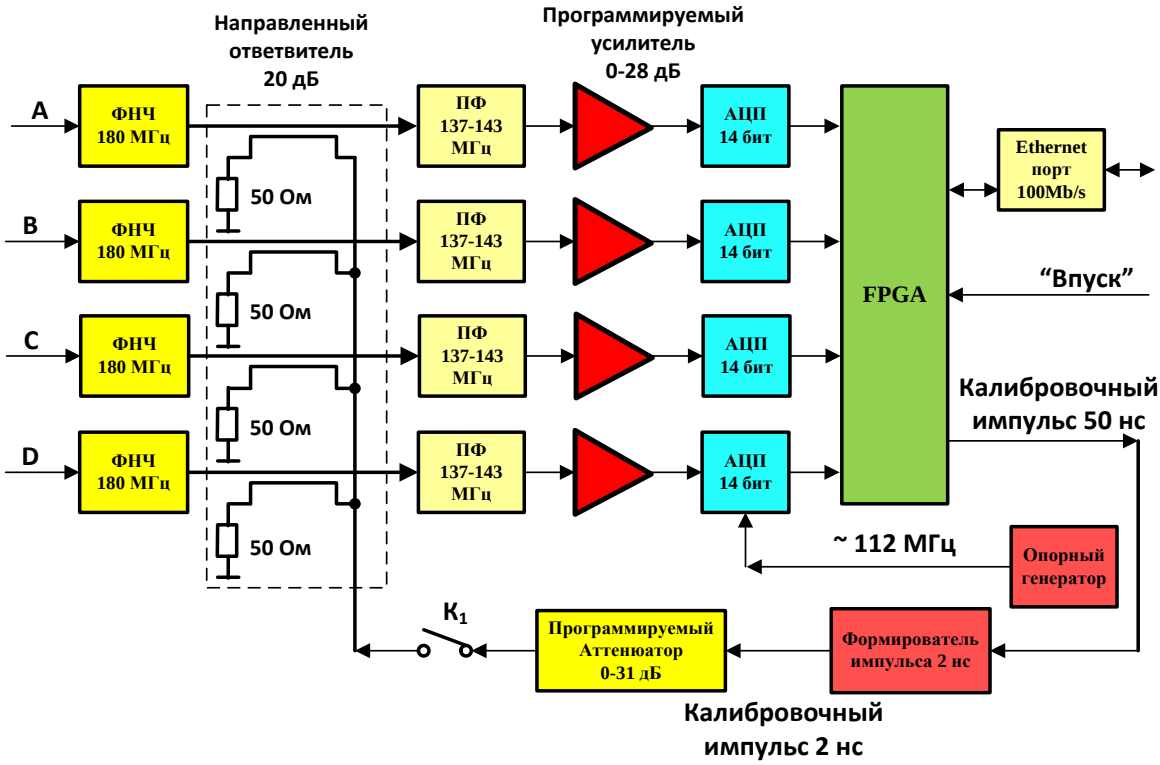

Рисунок 3.6.2. Блок-схема блока электроники для работы с одним пикапом

Данный блок представляет модуль евромеханики высотой 1U, включаемый в сеть питания 220 В. Модуль подсоединяется к сети Ethernet, через которую осуществляется управление модулем и получение данных.

Измерение тока в канале

Для измерения тока в канале можно использовать низкочастотный трансформатор тока. Полоса трансформатора выбирается так, чтобы интегрировать заряд последовательности коротких сгустков. Такой вид датчиков вместе с сопутствующей электроникой изготавливается в ИЯФ СО РАН.

Диагностика пучка в бустере

Диагностика пучка в бустере должна позволять выполнять следующие измерения:

1. Измерение среднего тока пучка.
2. Измерение распределения заряда по сепаратрисам (filling pattern).
3. Измерение орбиты пучка.
4. Измерение бетатронных и синхротронной частот.

5. Измерение продольного и поперечного размеров пучка.

Измерение среднего тока пучка

Для измерений среднего тока пучка предлагается использовать DCCT, выпускаемый фирмой Bergoz (Франция). На рис.3.6.3 представлен один из таких DCCT. Датчик тока выпускается вместе с фланцами. Существует широкая номенклатура данных изделий с разными диаметрами фланцев. В таблице 3.6.2 приведены основные параметры измерителя тока пучка типа NPCT-CF4.5"-60.4-120-UHV-H. Данный измеритель позволяет измерять время жизни пучка, а также эффективность инжекции и перепуска.

Рисунок 3.6.3. Датчик тока (DCCT) и электроника к нему

Таблица 3.6.2. Основные параметры измерителя тока пучка типа NPCT-CF4.5"-60.4-120-*UHV-H*

Параметр	**Величина**
Диапазон тока пучка	±200 мА, ±2 А
Рабочая полоса частот	10 кГц
Разрешение: стандартная модель модель с высоким разрешением	 < 5 μA/Гц$^{1/2}$ < 1 μA/Гц$^{1/2}$
Нелинейность	< 0.1 %
Температурная нестабильность δ_T	~0.5 μA/°C
Точность измерений	±0.1 % + δ_T

Измерение распределения заряда пучка по сепаратрисам

Для измерений распределения заряда пучка по сепаратрисам предлагается использовать FCT (fast current transformer), также выпускаемый фирмой Bergoz. Данный

FCT позволяет за 1 оборот получить картинку распределения заряда пучка по сепаратрисам. На рис.3.6.4 представлены FCT с различными диаметрами фланцев.

Рисунок 3.6.4. FCT от фирмы Bergoz

В таблице 3.6.3 приведены основные параметры измерителя тока пучка типа FCT-WB-CF6"-60.4-40-20:1-UHV-H.

Таблица 3.6.3. Основные параметры FCT-WB-CF6"-60.4-40-20:1-UHV-H.

Параметр	**Величина**
Максимальный среднеквадратичный ток пучка	1.4 А
Максимальный импульсный ток пучка	400 А
Рабочая полоса частот	9.5 кГц – 1750 МГц
Длительность фронта сигнала	~200 пс
Чувствительность	1.25 В/А

Сигнал от FCT будет преобразовываться в цифровой вид с помощью АЦП с разрядностью от 8 бит. Поскольку частота ВЧ в бустере ~180 МГц, то достаточно иметь частоту выборок АЦП ~1 ГГц. Подобные АЦП разработаны и изготавливаются и в ИЯФ СО РАН.

Измерение орбиты пучка

Измерение орбиты пучка в бустере будет осуществляться с помощью электростатических датчиков положения пучка (или пикапов). Для обеспечения качественной коррекции орбиты пучка обычно рекомендуется использовать как минимум 4 пикапа на 1 период бетатронных колебаний. Таким образом, общее количество пикапов в бустере предполагается 40-60 шт.

Пример пикапа, разработанного и изготовленного в ИЯФ СО РАН для бустера источника СИ NSLS-II (BNL, USA) приведён на рис.3.6.5.

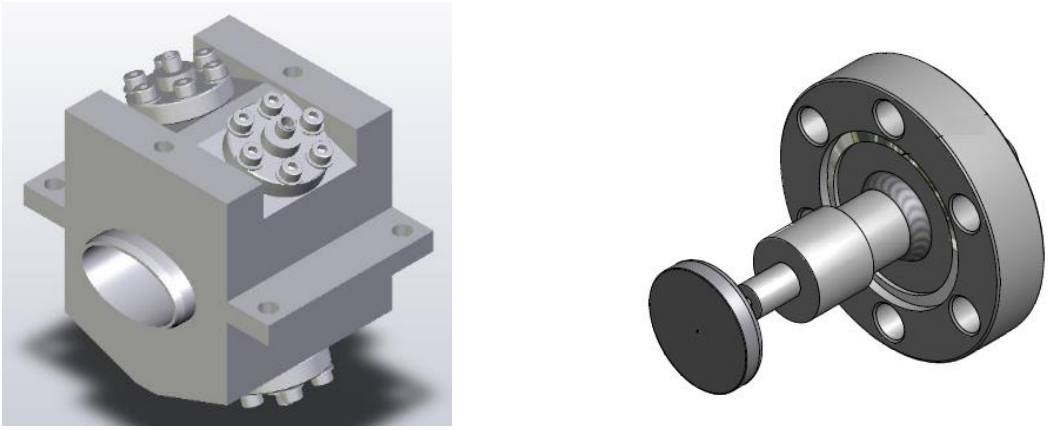

Рисунок 3.6.5. Пикап для бустера NSLS-II: слева – пикап в сборке, справа – вакуумный ввод

В качестве электродов пикапа используются “пятаки” диаметром 15 мм, которые привариваются прямо к вакуумному вводу, оканчивающегося разъёмом типа SMA. В данных пикапах для бустера NSLS-II использовались вакуумные вводы с уже готовыми фланцами. Для бустера источника предлагается использовать вакуумные вводы типа SMA без фланцев (они значительно дешевле), которые затем будут привариваться прямо к корпусу пикапа.

Поскольку пикапы обладают значительной нелинейностью (нелинейностью зависимости напряжений сигналов на электродах от смещения пучка), предполагается их линеаризация. Для этого на специальном автоматизированном измерительном стенде для каждого пикапа снимается координатная сетка (на основе измерений сигналов с электродов для каждого положения калибровочного стержня), на основе которой вычисляются коэффициенты полинома для расчёта координат пучка.

Электроника пикапов должна обеспечивать пооборотные измерения пучка для всего времени цикла работы бустера. На рис.3.6.6 приведена блок-схема блока электроники, работающего с одним пикапом.

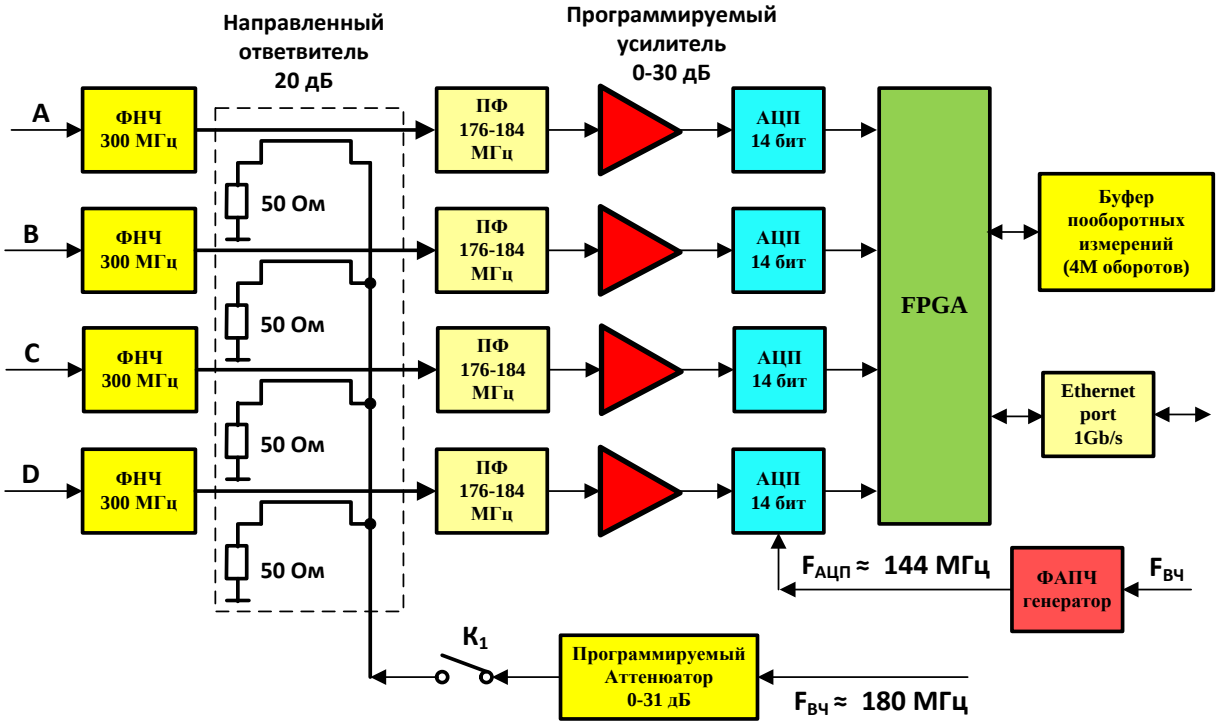

Рисунок 3.6.6. Блок-схема блока электроники для работы с одним пикапом бустера

Из сигнала с пикапа выделяется гармоника частотой с частотой ВЧ ~180 МГЦ, далее сигнал преобразуется в цифровой вид и обрабатывается уже в цифровом виде. В FPGA вычисляются величины сигналов с электродов пикапа за каждый оборот, которые затем записываются в память ёмкостью 4М. В результате, по окончании каждого цикла работы бустера мы будем иметь измеренное положение пучка за каждый оборот – от инжекции до выпуска. После выпуска пучка перед началом следующего цикла работы бустера на входы всех 4-х каналов через направленный ответвитель одновременно подаётся калибровочное напряжение с частотой ВЧ, что позволяет уменьшить погрешность измерений, возникающей из-за неодинаковости и нестабильности коэффициентов передач каналов. Относительная точность измерений положения пучка порядка 10 мкм является достаточной для бустера.

Каждый блок электроники для одного пикапа представляет собой модуль евромеханики высотой 1U, включаемый в сеть питания 220 В. Модуль подсоединяется к сети Ethernet 1 Гбит/с, через которую осуществляется управление модулем и читаются результаты измерений. Блоки электроники размещаются в стойке. В этой же стойке находится блок распределения синхросигналов, который в оптическом виде получает синхросигналы (ВЧ, частота обращения, “Впуск”) и в электрическом виде выдаёт эти синхросигналы в каждый блок электроники пикапов.

Измерение бетатронных частот

В принципе система измерения орбиты пучка позволяет измерять бетатронные частоты во время инжекции с помощью вычисления спектра остаточных колебаний пучка (возникающих после инжекции). Тем не менее, важно иметь информацию о бетатронных частотах и во время цикла ускорения пучка, особенно в процессе запуска бустера. Для этого будет использована отдельная система измерения бетатронных частот на основе резонансного возбуждения колебаний пучка. Подобная система была разработана и изготовлена для бустера NSLS-II. Принцип работы системы показан на рис.3.6.7.

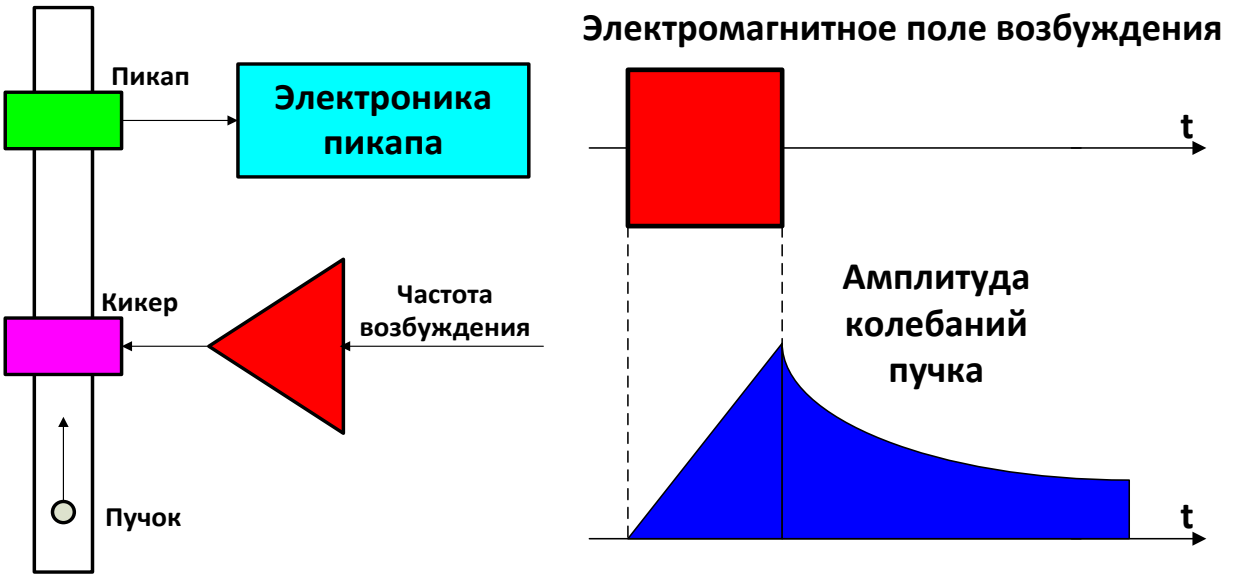

Рисунок 3.6.7. Принцип работы системы: слева – схема системы, справа – временная диаграмма

Пикап и кикер представляют собой 50-омные согласованные полосковые линии. На кикер подаётся радиочастотный (РЧ) импульс возбуждения с частотой, близкой к бетатронной частоте. По окончании РЧ импульса пучок совершает затухающие бетатронные колебания, которые регистрируются пикапом. Электроника пикапа по спектру этих колебаний вычисляет бетатронную частоту и корректирует частоту возбуждения. Минимальное время одного измерения составляет около 1 мс. Таким образом, мы имеем следящую систему, в которой частота возбуждения пучка следует за измеренной бетатронной частотой. Точность измерений бетатронной частоты составляет порядка 10^{-4} F_0, где F_0 – частота обращения. Количество измерений за время подъёма энергии пучка может составлять несколько сотен.

Диагностика пучка в основном синхротроне

Диагностика пучка в основном синхротроне должна позволять выполнять следующие измерения:

1. измерение среднего тока пучка;
2. измерение распределения заряда по сепаратрисам;
3. измерение орбиты пучка;
4. измерение бетатронных и синхротронной частот;
5. измерение продольного и поперечного размеров пучка.

Измерения в основном синхротроне в пунктах 1, 2, 4, 5 аналогичны данным измерениям в бустере, которые были рассмотрены выше. Учитывая предельно малый эмиттанс пучка в основном синхротроне, особые требования накладываются на точность измерений положения пучка. Считается, что относительная погрешность измерений положения пучка не должна превышать порядка 10% от размеров пучка. Отсюда вытекают требования к относительной точности измерений – она должна быть лучше 1 мкм. Таким требованиям удовлетворяет электроника пикапов семейства Libera фирмы Instrumentation Technologies. В ИЯФ СО РАН также существует соответствующая разработка. В частности, для накопителя ВЭПП-3 были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию блоки электроники, позволяющие достичь точности порядка 1 μм. На базе этой электроники могут быть разработаны новые блоки электроники пикапов, удовлетворяющие всем требованиям синхротрона. На рис.3.6.8 представлена блок-схема блока электроники для одного пикапа для основного синхротрона.

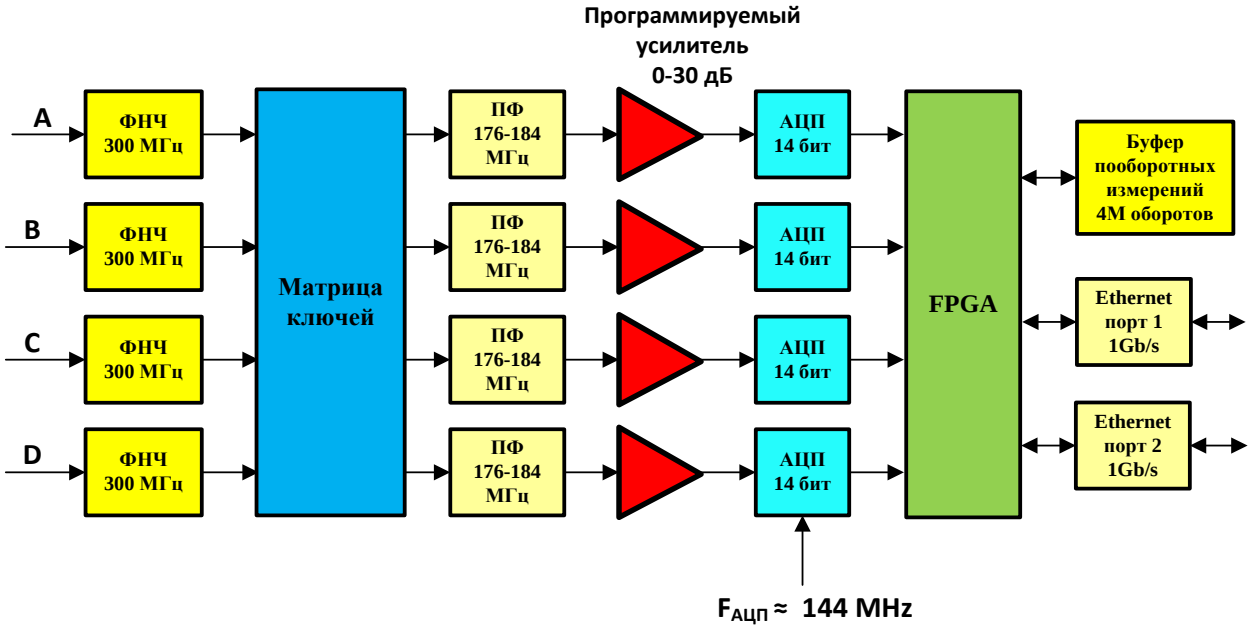

Рисунок 3.6.8. Блок-схема блока электроники для работы с одним пикапом основного синхротрона

В данном блоке на входе используется так называемая матрица ключей, позволяющая соединять каждый из 4-х аналоговых каналов с каждым из электродов пикапа. Это позволяет минимизировать погрешность измерений, возникающих из-за неодинаковости и нестабильности коэффициентов передач каналов. Подобный метод используется и в блоках электроники семейства Libera.

Данный блок электроники также обеспечивает пооборотные измерения. Измерения положения пучка выполняются с частотой ~10 кГц, что необходимо для работы системы широкополосной стабилизации орбиты. Разрешение измерений (среднеквадратичное отклонение результатов измерений) при времени измерения ~100 мкс должно быть лучше 1 мкм.

Блок имеет 2 гигабитных Ethernet порта. Порт 1 используется для управления и передачи данных в компьютеры системы управления синхротроном. Порт 2 служит для непрерывной передачи данных с частотой ~10 кГц в систему широкополосной (с полосой до 400 Гц) стабилизации орбиты пучка.

Каждый блок электроники для одного пикапа представляет собой модуль евромеханики высотой 1U, включаемый в сеть питания 220 В. Блоки электроники размещаются в стойке. В этой же стойке находится блок распределения синхросигналов, который в оптическом виде получает синхросигналы (ВЧ, частота обращения, “Впуск”) и в электрическом виде выдаёт эти синхросигналы в каждый блок электроники пикапов. При необходимости можно использовать стойки, внутри которых обеспечивается стабилизация температуры на уровне 0.1-1 °C.

Система широкополосной стабилизации орбиты пучка может быть построена следующим образом. Все пикапы синхротрона разделяются на группы. Блоки электроники каждой группы через Ethernet порты 2 соединяются со своим блоком управления корректорами, который на основании результатов измерений положения пучка, полученных из блоков электроники пикапов, вычисляет поправки в токи корректоров.

Количество пикапов в основном синхротроне также определяется, исходя из положения, что на 1 период бетатронных колебаний должно быть, как минимум, 4 пикапа. Таким образом, общее количество пикапов в синхротроне предполагается 60-80 шт. Пикапы в синхротроне должны обеспечивать относительную точность лучше 1 мкм, для чего при конструировании пикапа необходимо уделить повышенное внимание изменению его геометрических размеров при изменении температуры, в том числе, при нагреве от пучка.

Оптическая диагностика пучка

Методы оптической диагностики традиционно применяются для измерения радиального и вертикального размеров σ_x, σ_y и продольного размера σ_z электронных/позитронных пучков с помощью регистрации испускаемого ими синхротронного излучения (СИ). При этом СИ выводится из поворотных магнитов ускорителя. В одном суперпериоде ЦКП «СКИФ» присутствуют два дипольных магнита с полем 5 кГс (сильный) и 3.5 кГс (слабый).

Представляется разумным заложить возможность регистрации излучения в двух каналах, расположенных в одном суперпериоде, как в оптической, так и рентгеновской области спектра СИ. Канал, из которого выводится излучение в рентгеновской области спектра, можно использовать не только для диагностики профиля пучка, например, с помощью камеры обскуры, но и для исследований по фотолюминсценции, подобных тем, что ведутся на ВЭПП-3, а также для организации учебной станции, аналогичной планируемой на ВЭПП-4. Кроме того, рентгеновское излучение можно применять для измерения размеров пучка с использованием рефракционной оптики.

Исходя из этих соображений, место расположения вывода оптической части спектра СИ из вакуумной камеры предлагается организовать в точке максимального значения вертикальной бета-функции поворотного магнита со слабым полем в одном из суперпериодов.

Параметры синхротронного излучения в точках вывода из камеры

Спектры синхротронного излучения, испускаемого пучком в этой точке орбиты при энергии E_b = 3000 МэВ в радиальной плоскости, показаны на рис.3.6.9. Стрелкой обозначена условная граница пропускания бериллиевой фольги.

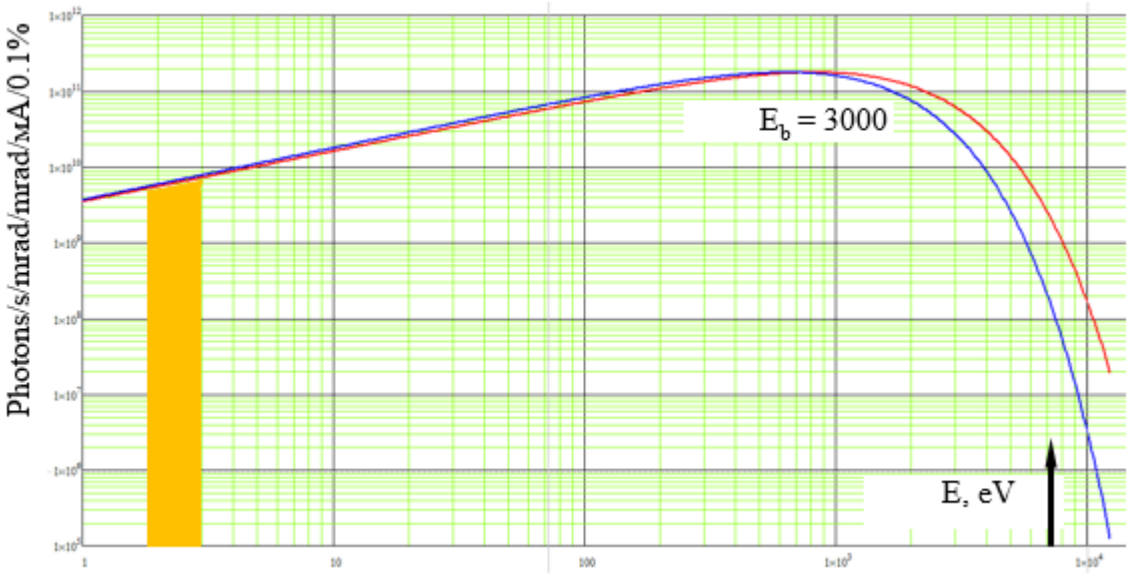

Рисунок 3.6.9. Спектр синхротронного излучения из дипольных магнитов суперпериода с H = 5 кГс (красный) и 3.5 кГс (синий) м для энергии пучка E_b = 3000 МэВ. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра.

На рис.3.6.10 показана угловая расходимость излучения в рентгеновском диапазоне (λ = 1 нм, близко к критической длине волны) для «сильного» диполя и в оптическом диапазоне спектра (λ = 500 нм) для «слабого» диполя в вертикальной плоскости для энергии Eb = 3000 МэВ.

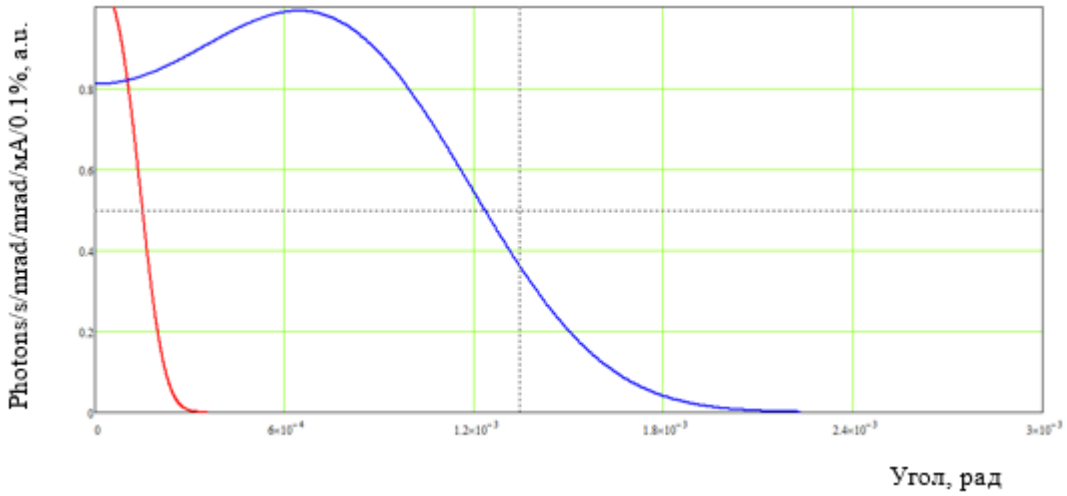

Рисунок 3.6.10. Расходимость излучения из «сильного» диполя в вертикальной плоскости для длины волны 1 нм (красная кривая) и для «слабого» диполя на 500 нм (синяя кривая), E_b= 3000 МэВ

Использование для диагностики рентгеновской части спектра при регистрации СИ из «слабых» диполей нецелесообразно, т.к. в спектре излучения из этого магнита на порядок меньше гамма-квантов с энергией выше 6 кэВ, чем в спектре СИ из «сильного» диполя.

Суммарная мощность P_{SR} излучения из «слабого» диполя в один миллирадиан телесного угла при токе пучка в 1 мА на энергии 3000 МэВ равна приблизительно 0.3 мВт, т.е. для полного проектного тока пучка I_b = 400 мА мощность СИ P_{SR} составит 1.2 Вт.

Расходимость пучка СИ в рентгеновском диапазоне на полувысоте на этой энергии составляет (рис. 3.6.10) $\theta \approx 1.3 \cdot 10^{-4}$ рад. При расстоянии от точки излучения до первого зеркала L = 10 м плотность мощности на нем окажется равной $P_d = P_{SR}/(L \cdot \theta)^2 \approx 0.15$ Вт/см^2 в полосе шириной около $4L \cdot \theta \approx 5$ мм в радиальной плоскости при полном токе пучка. При этом область на зеркале, занятая видимой частью спектра СИ, будет иметь ширину около 25 мм на полувысоте.

Такое большое различие в расходимости излучения в рентгеновском и видимом диапазоне спектра позволяет, в принципе, использовать только один канал вывода СИ из «сильного» магнита, при этом первое зеркало системы оптической диагностики можно сделать составным, пропуская рентгеновское излучение через отверстие в центральной части зеркала. Это удешевит предлагаемую конструкцию диагностики.

Ограничения на измеряемые размеры пучка, связанные со свойствами СИ

Минимальный измеряемый вертикальный размеры пучка, определяемый расходимостью СИ в оптическом диапазоне (дифракционный предел) и минимальный измеряемый радиальный размер, определяемый отрезком орбиты пучка, с которого регистрируется излучение, составляют:

$$\sigma_d \approx \left(\frac{\lambda^2 R}{12\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 60 \text{ мкм},$$

$$\sigma_R \approx \frac{R\psi^2}{2} \approx 70 \text{ мкм},$$

где λ = 500 нм – длина волны света, R = 86 м – радиус орбиты, $\psi = 1.2 \cdot 10^{-3}$ рад. - расходимость излучения. Таким образом, для определения поперечных размеров пучка, особенно его вертикального размера, окажется недостаточно использовать лишь проекционную оптику.

Конструкция и состав оптической диагностики

За основу дизайна оптической диагностики пучков с-τ фабрики предлагается взять аналогичную систему, успешно функционирующую на источнике синхротронного излучения «Сибирь-2», рис.3.6.11 и рис.3.6.12.

Система оптической диагностики, установленная в 2013 году на источнике СИ «Сибирь-2», предназначена для контроля положения пучка и определения как продольного

его размера, так и поперечных вертикального и радиального. Система диагностики использует СИ из поворотного магнита кольца «Сибирь-2», а располагается за биозащитой кольца накопителя, что упрощает процесс настройки и саму работу с ней. Система хорошо зарекомендовала себя в работе, и принципы ее построения можно использовать для аналогичных целей на ЦКП «СКИФ». Параметры пучка СИ в «Сибирь-2» похожи на синхротронное излучение на ЦКП «СКИФ», поэтому можно ожидать, что поведение наиболее нагруженной по теплу первой части оптического тракта, охлаждаемого зеркала, будет стабильным.

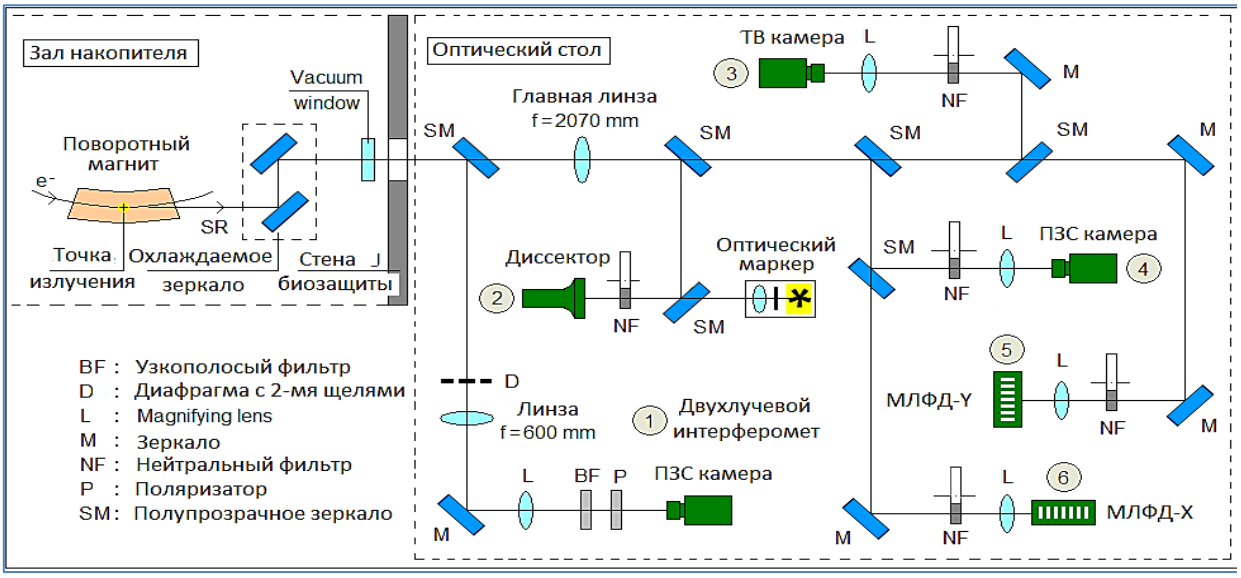

Рисунок 3.6.11. Схема расположения компонентов системы оптической диагностики «Сибирь-2»

Пучок СИ из поворотного магнита накопительного кольца проходит по вакуумному каналу и падает на охлаждаемое зеркало, от которого отражается видимая часть спектра, которая после отражения от второго, не охлаждаемого, зеркала выводится через окно вакуумной камеры в атмосферу. Далее СИ выводится за пределы биозащиты зала накопителя и распределяется между 6-ю диагностиками, установленными на оптическом столе, с помощью зеркал и оптических призм. Изображение пучка формируется на всех элементах системы с помощью главной линзы и линз увеличения. Также для расширения динамического диапазона системы диагностики пучок проходит через дистанционно управляемые нейтральные фильтры, установленные перед всеми детекторами диагностики за исключением интерферометра.

Вакуумный вывод СИ на стол оптической диагностики показан на рис.3.6.12 (вакуумная камера ускорителя и поворотный магнит не показаны). Охлаждаемое зеркало установлено на расстоянии 6-ти метров от точки излучения. Кварцевое окно вывода СИ

расположено после второго зеркала, через него выводится видимая часть спектра СИ, проходящая через канал в стене биозащиты до стола с элементами диагностики.

Рисунок 3.6.12. 3D модель системы оптической диагностики

Элементы системы диагностики

Система оптической диагностики включает в себя шесть диагностик (обозначены цифрами на рис.3.6.11).

Двухлучевой интерферометр (1) предназначен для измерения поперечного вертикального размера пучка с точностью до 1 мкм.

Принцип измерений, основанных на пространственной когерентности света, известен как теорема Ван Циттера-Цернике, из которой следует, что видимость зависит от расстояния между щелями и угла, под которым виден источник из средней точки между щелями (для схемы Юнга). Измерив видимость интерференционной картины и зная расстояние между щелями, можно определить угловые размеры источника излучения, например, пучка частиц (рис.3.6.13).

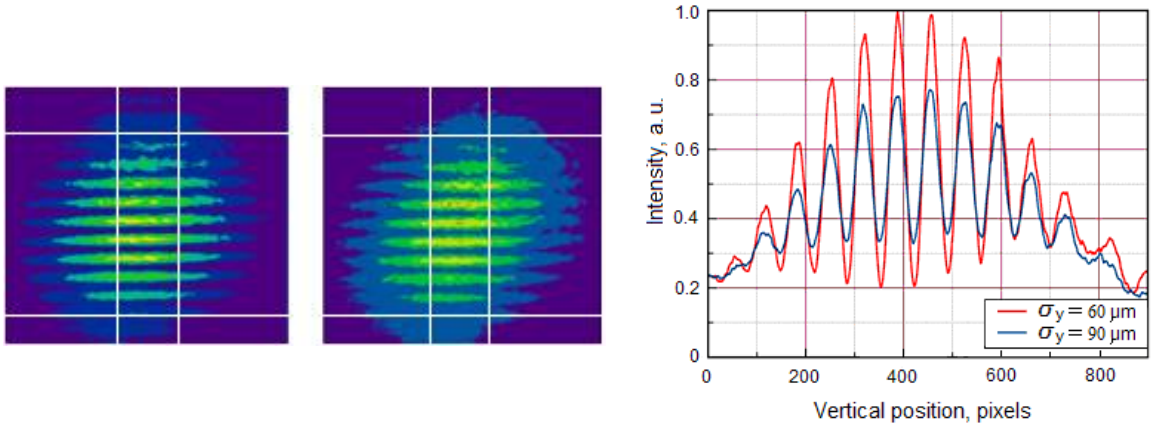

Рисунок 3.6.13. Слева: интерферограммы, соответствующие вертикальному размеру пучка в 60 мкм и 90 мкм. Справа: сечение интерферограммы. Распределение интенсивности проинтегрировано в пределах области, ограниченной вертикальными линиями

Для диагностики пучков используются интерферометры с делением волнового фронта, работающие с поляризованным квазимонохроматическим синхротронным излучением в видимом диапазоне. Поток фотонов СИ образует интерферограмму после прохождения двойной щели, фильтрующих и фокусирующих систем. Определяя видность интерференционной картины можно определить характерный размер источника излучения.

Среднеквадратичный размер пучка σ_x выражается через среднеквадратичную ширину γ степени пространственной когерентности γ

$$\sigma_x = \frac{\lambda L}{\pi D}\sqrt{\frac{1}{2}\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)},$$

где L – расстояние между источником излучения и щелями, D – расстояние между щелями.

Интенсивности интерферограммы, с учетом дифракции на щелях и при отсутствии дисбаланса интенсивностей света, проходящего через щели, будет определяться выражением

$$I(y) = I_0\frac{\sin(\alpha)}{\alpha}\left(1+\exp\left(-\frac{2(\pi D\sigma_x)^2}{(\lambda L)^2}\right)\cos\left(\frac{2\pi D}{\lambda R}y\right)\right), \text{ где } \alpha = \frac{2\pi a}{\lambda R}y.$$

Пространственное разрешение интерферометра определяется погрешностью измерения пространственной когерентности (видности). При измерении видности самый большой вклад в погрешность вносит дисперсия света в оптической системе. Дисперсия приводит к разности оптических путей, и, как следствие, к изменению фазы интерферограммы для разных длин волн. Погрешность измерения вертикального размера пучка при помощи двухщелевого интерферометра, достигнутая на «Сибирь-2», составила 5 мкм, что в несколько раз хуже разрешающей способности этого метода, достигнутой с

использованием зеркал вместо линз. Поэтому оптическая схема интерферометра будет пересмотрена с учетом этого обстоятельства.

Диссектор (2) используется для определения продольного размера пучка в кольце накопителя, так же может использоваться для диагностики продольных неустойчивостей пучка.

Быстродействие прибора определяется его головной частью, аналогичной стрик-камере и состоящей из фотокатода, ускоряющей сетки, электронной линзы, отклоняющих пластин и щелевой апертуры (рис.3.6.14).

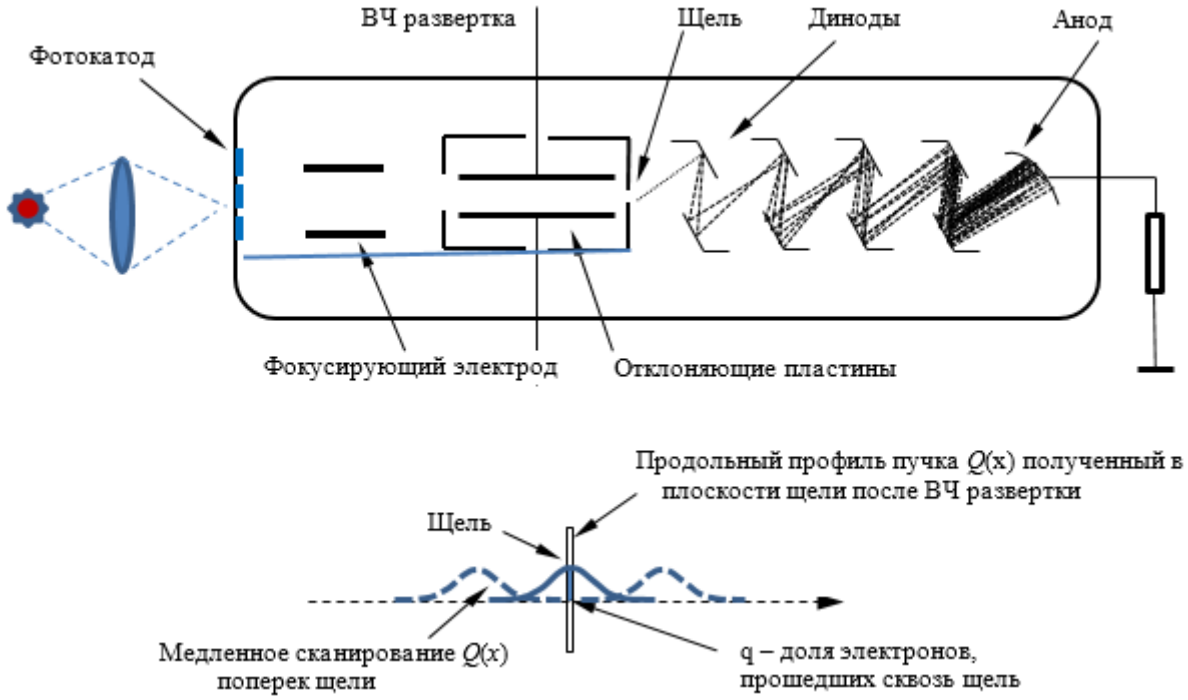

Рисунок 3.6.14. Упрощенная схема устройства диссектора и схема медленного сканирования продольного распределения Q(x) поперек щели диссектора

Отличие диссектора от стрик-камеры заключается в том, что он предназначен для регистрации периодических сигналов, таких, как вспышки синхротронного излучения пучка в циклическом ускорителе либо импульсы лазера. Если на фотокатоде диссектора построено точечное изображение периодического источника света, а частота ВЧ развертки диссектора νRF синхронизована с частотой светового сигнала, то в плоскости щели диссектора образуется стационарное электронное распределение Q(x), соответствующее временному распределению в световом импульсе. Типичная частота ВЧ развертки составляет десятки МГц.

Распределение $Q(x)$ медленно сканируется поперек щели, время сканирования $t_{sl} >> 1/\nu_{RF}$. Средний анодный ток на выходе ВЭУ пропорционален заряду, прошедшему через щель в данный момент сканирования и, соответственно, повторяет распределение

интенсивности светового импульса. Для сканирования используется медленно меняющееся пилообразное напряжение U_{sl}, прикладываемое к отклоняющим пластинам вместе с ВЧ разверткой [5], при этом $U_{sl}^{max} > U_{RF}^{max}$.

Как правило, длительность пучка в циклическом ускорителе много меньше периода обращения, поэтому сканирующее ВЧ напряжение является n-ой гармоникой частоты обращения, (n>>1). До сих пор в экспериментах использовался диапазон частот в пределах 4-100 МГц, в зависимости от ускорителя.

Простой способ калибровки временной шкалы является важным эксплуатационным преимуществом диссектора. Если сфокусировать на его фотокатод постоянный точечный источник света, то в плоскости щели при включенной ВЧ развертке будет периодически появляться распределение заряда $Q_p(x)$, показанное на рис. 3.6.15, которое будет считываться при медленном сканировании. Пространственный интервал между характерными «метками», и соответствующий ему измеряемый в результате сканирования временной интервал T_l зависит от U_{RF}^{max}, но временной масштаб диссектора T_s при этом определяется однозначно, поскольку время T_l соответствует $T_s = 2/\omega_{RF} = T_{RF}/\pi$, где ω_{RF} – угловая частота ВЧ развертки.

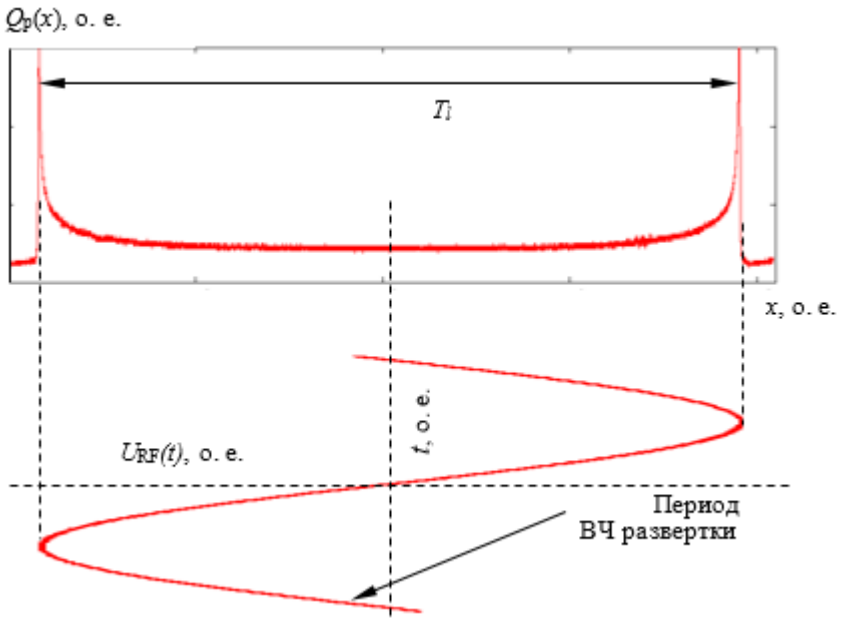

Рисунок 3.6.15. Калибровка временной шкалы диссектора с помощью постоянного точечного источника света

При таком способе сканирования развертка диссектора линейна лишь в середине временной шкалы и меняется в пределах периода ВЧ. Экспериментальные результаты измерений временного разрешения диссектора позволяют получить значение t_l = 3.8±0.4 пс, что позволяет измерять продольный размер пучка на ЦКП «СКИФ» с точностью несколько

процентов. В настоящее время временное разрешение улучшено до 1.5 пс, но этот результат пока не опубликован. На рис.3.6.16 и рис.3.6.17 представлены результаты измерений диссектором продольного профиля пучка на установке MLS.

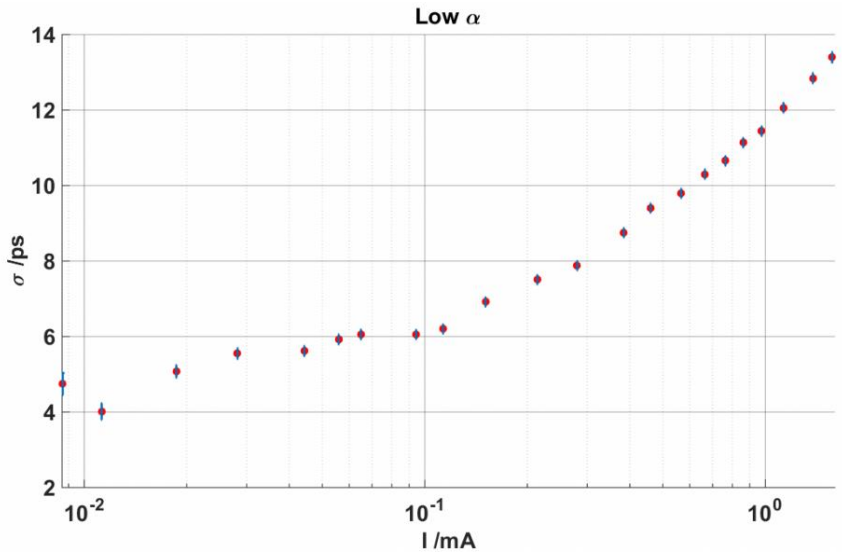

Рисунок 3.6.16. Зависимость длины пучка от тока в режиме low-α, измеренная с помощью диссектора на ускорителе MLS

Наряду с диссектором для измерения продольного размера пучка в отдельных банчах целесообразно эпизодически использовать стрик-камеру. Поскольку этот прибор не столь чувствителен к световым потокам как диссектор, необходимо предусмотреть в конструкции оптического тракта диагностики подвижное зеркало, отводящее свет из оптического канала на стрик-камеру.

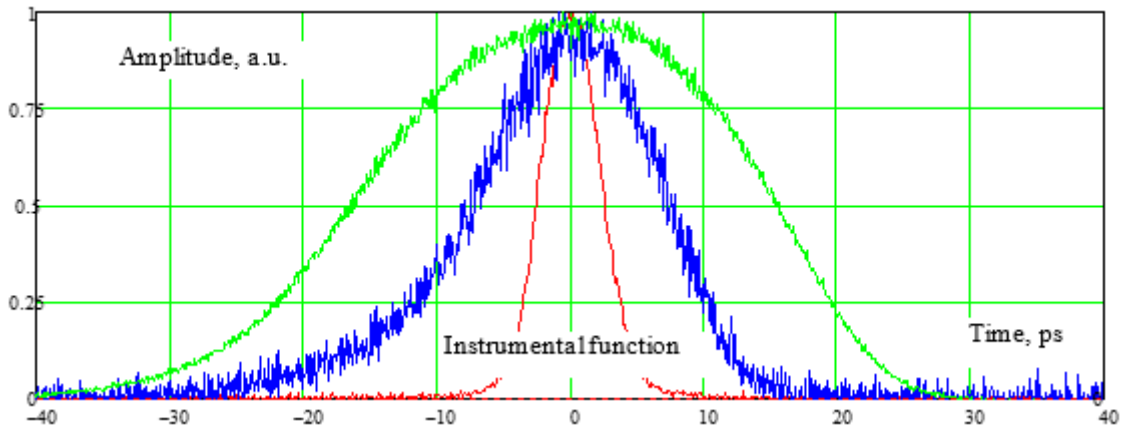

Рисунок 3.6.17. Продольные профили пучка на установке MLS, зарегистрированные диссектором

ТВ камера (3) осуществляет вывод поперечного изображения пучка на монитор для визуального контроля динамики пучка.

ПЗС камера (4) (Prosilica GC 1290) с разрешением ПЗС матрицы 1280x960 точек. Используется для передачи изображения пучка по интерфейсу Ethernet дальнейшего определения его поперечного вертикального и радиального размеров.

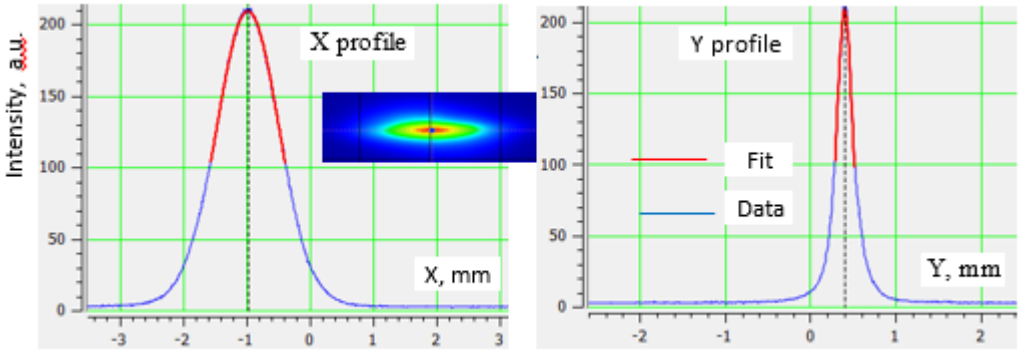

Рисунок 3.6.18. Изображение пучка, построенное цифровой камерой, и его подгонка распределением Гаусса

Многоканальные лавинные фотодиоды (МЛФД) (5,6) предназначены для пооборотного измерения поперечного вертикального и радиального распределения интенсивности пучка в течении многих оборотов. Использование МЛФД поможет проводить исследования неустойчивостей и нелинейной динамики пучка на ускорителе.

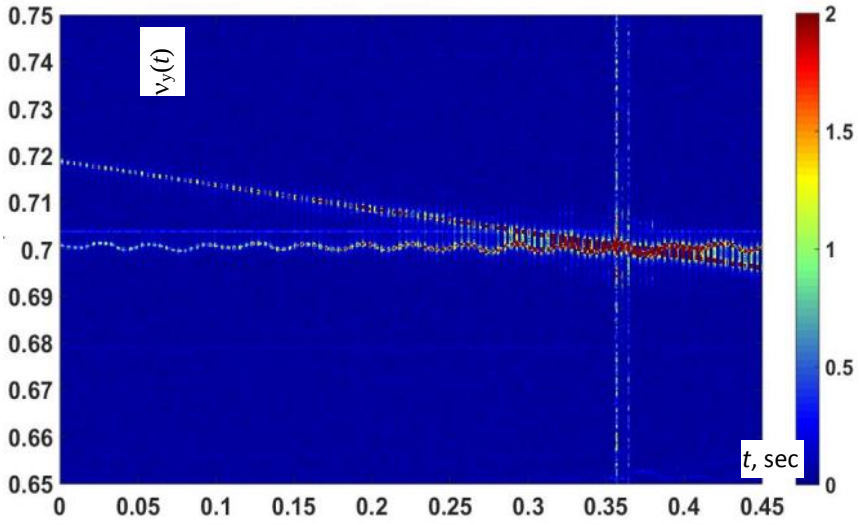

Рисунок 3.6.19. Измерение вертикальной бетатронной частоты методом раскачки с помощью МЛФД. Регистрируется измерение вертикального размера пучка

Перечисленный набор средств диагностики хорошо зарекомендовал себя в работе на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М и источнике СИ «Сибирь-2» на протяжении многих лет. Полученный при эксплуатации этих установок опыт позволяет утверждать, что при помощи регистрации СИ в оптическом диапазоне можно надежно измерять и контролировать продольный и поперечный размеры пучка.

Оптическая диагностика бустера

Размеры пучка необходимо контролировать не только в основном кольце ЦКП «СКИФ», но и в его бустере. Для этого можно использовать такую же оптическую диагностику, как в основном кольце, но в упрощенном виде. Из перечисленных диагностических каналов в оптической диагностике бустера можно оставить диссектор, цифровую и телевизионную камеры. Система вывода излучения из вакуумной камеры также может быть упрощена: в связи с малым током пучка в бустере нет необходимости использовать перископическую систему, достаточно применить одиночное охлаждаемое зеркало внутри вакуумной камеры бустера, подобное тем, что применяются на коллайдерах ИЯФ СО РАН.

3.7. Система управления комплекса СИ

Система управления ускорительного комплекса, предназначенного для экспериментов с синхротронным излучением, является его важнейшим элементом, определяя качество и надёжность работы источника СИ.

Эскизный проект включает описание сетевой структуры и архитектуры СУ, обсуждение подходов и возможных решений при создании аппаратной инфраструктуры, программные средства.

Общие требования к Системе Управления комплекса СИ и её глобальная структура

Исходя из анализа Систем Управления действующих источников СИ, и участия в создании ряда этих источников, можно сформулировать следующие требования к СУ будущего комплекса и её структуре:

- обеспечение слаженной работы всех компонент комплекса: линейного ускорителя, бустера и основного кольца, а также экспериментальных станций;
- оцифровка и сохранение как можно большего числа характеристик для накопления статистики о работе комплекса с целью минимизации времени простоя;
- высокая надёжность (отказоустойчивость) системы управления, обеспеченная возможностью оперативной замены и ремонта её компонентов, а также дублированием и резервированием наиболее ответственных элементов;
- выбор соответствующих аппаратных и программных решений, позволяющих обеспечить время жизни комплекса в несколько десятков лет;
- единая программная платформа как ускорителей комплекса, так и пользовательских станций;
- разграничение прав доступа к информации и управлению для персонала различного уровня (оператор установки, оператор экспериментальной станции, технический специалист, потенциальный пользователь и др.).
- использование распространённых стандартов, протоколов и т.п., что обеспечит возможности интеграции в систему управления оборудования и программных систем различных производителей.

Сетевая структура СУ

Глобальная структура сети системы управления показана на рис.3.7.1. Общая структура практически всех современных систем управления большими физическими установками представляет собой распределённую сеть узлов контроля, соединённых

посредством сети Ethernet. Решения для проектируемого источника СИ не является исключением. Планируется разделить эту сеть на несколько отдельных физических сегментов, доступ между которыми возможен только при помощи специальных шлюзов. Такая структура позволит обеспечить безопасность и разделение контуров технических подсистем и пользовательской сети между собой. Эскизная схема сети системы управления показана на следующем рисунке. Сетевая и серверная инфраструктура будет построена на широко распространённых аппаратных решениях от компаний HPE, SuperMicro, с которыми имеется необходимый опыт работы.

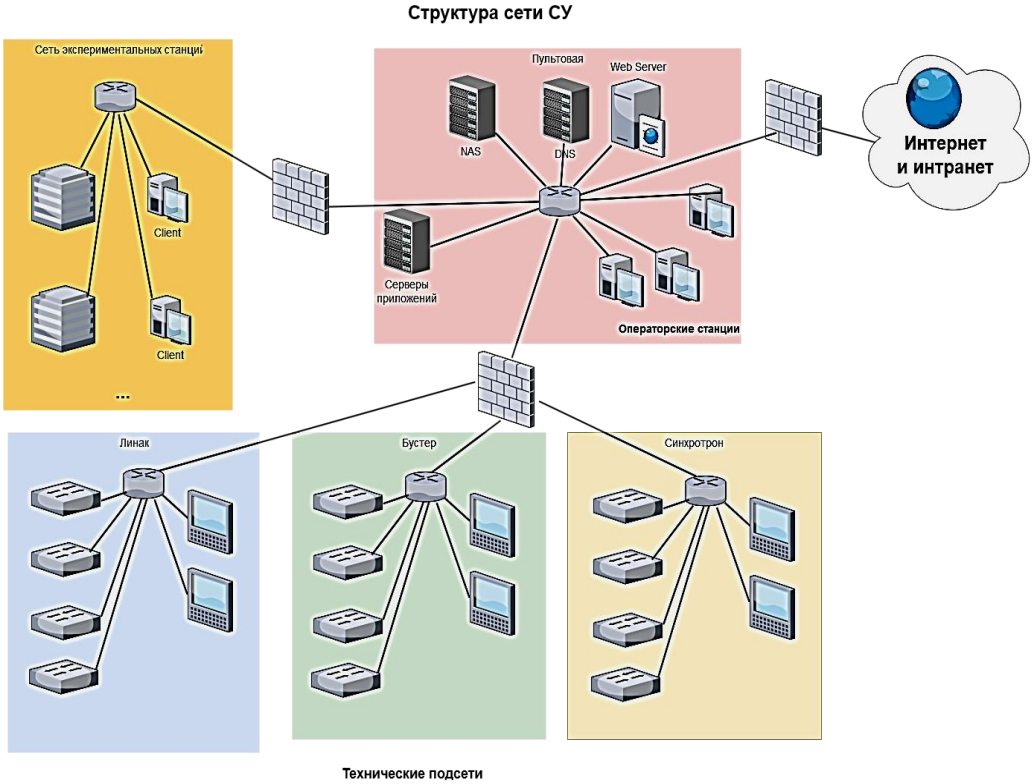

Рисунок 3.7.1. Глобальная структура сети системы управления

Архитектура системы управления

С точки зрения архитектуры система управления будет реализована по классической трёхуровневой схеме (рис.3.7.2). На нижнем уровне располагаются управляющие компьютеры и программное обеспечение, обеспечивающее непосредственный доступ к устройствам и оборудованию или целым подсистемам, в то же время он скрывает от верхних уровней особенности их подключения и протоколов управления. На среднем уровне располагаются серверы приложений, обработки и хранения данных, базы данных и пр. На верхнем уровне располагается клиентское ПО и компоненты отображения состояния. Все уровни между собой связаны при помощи программной прослойки,

называемой транспортным протоколом. В качестве такого ПО будет использоваться TANGO.

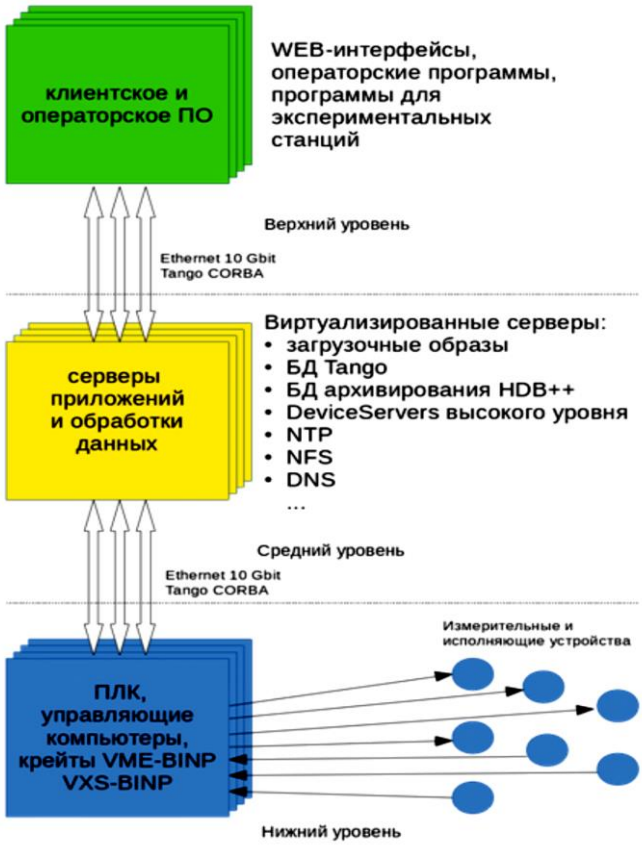

Рисунок 3.7.2. Архитектура системы управления

Аппаратная инфраструктура

При выборе решений в аппаратном обеспечении СУ прежде всего необходимо определиться с основными аппаратными платформами, интерфейсами устройств и изготовителями/поставщиками необходимого оборудования. При рассмотрении различных возможностей оснащения СУ аппаратными средствами, наиболее целесообразной признана стратегия, основанная на самостоятельной разработке большинства электронных измерительных и управляющих устройств, образующих СУ. Такая стратегия обладает следующими преимуществами:

- экономическая целесообразность: стоимость электроники внешних, чаще всего зарубежных производителей, в несколько раз выше, чем стоимость подобных устройств собственной разработки даже при относительно небольших сериях;
- возможность усовершенствования и улучшения функциональности созданных устройств в ходе эксплуатации, что реально только для электроники собственной разработки;

- в процессе разработки появляется коллектив специалистов, владеющих всей информацией по данному проекту и имеющих необходимый опыт в эксплуатации созданного оборудования и, как следствие, способных обеспечить его высокую надёжность.

Следует отметить, что разрабатываемая аппаратура будет выполнена в распространённых стандартах, что при необходимости, позволит интегрировать в систему управления покупные (COTS) модули.

Опишем классы электронных устройств, предлагаемых для построения подсистем глобальной системы управления. Представленная номенклатура позволяет решить широкий круг задач по построению контрольно-измерительной аппаратуры, систем сбора данных и управления технологическим оборудованием.

Модульная платформа VME64 BINP как основа локальных многофункциональных контроллеров

В СУ ускорительных комплексов существуют задачи, которые могут быть решены лишь с помощью, так называемых, модульных платформ, иначе называемых магистрально-модульными системами. Главным свойством стандартных магистрально – модульных систем является возможность объединения в единый узел (локальный контроллер) различных модулей, что позволяет создавать локальные контроллеры различного назначения, используя не очень широкую номенклатуру устройств. Прежде всего, модульные платформы используются в задачах, требующих объединения в локальную подсистему аппаратуры, требующей жёсткой синхронизации. Это аппаратура собственно устройств синхронизации, сфазированных с ВЧ элементами ускорителей комплекса и обеспечивающих единое время в территориально разнесённых подсистемах комплекса. Это также аппаратура подсистем впуска/выпуска и каналов перепуска. На модульных платформах органично реализуются и подсистемы цифровой осциллографии и мониторинга импульсных элементов, а также подсистемы регистрации аварийных процессов в мощных элементах комплекса.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разработан комплект аппаратуры в магистрально – модульном стандарте VME64x. Базовым элементом локальных контроллеров, создаваемых на этой модульной платформе, является крейт VME64 BINP. Это стандартный крейт VME64x с допускаемым стандартом расширением функционала нижней магистрали J2, что даёт возможность организации жёсткой межмодульной синхронизации в подсистемах, упоминавшихся выше. В этом стандарте разработаны и изготавливаются в Экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН одиннадцать типов модулей, на базе которых проектируются подсистемы синхронизации и импульсные подсистемы СУ.

Управление территориально распределённых устройств с низким трафиком

В структуре физических комплексов заметное место занимают мощные устройства. Как правило, мощные устройства рассредоточены на большой территории и размещены вблизи от элементов установки. С позиций системы управления, современным решением для таких устройств является встраивание в них электронных узлов, в которых реализованы необходимые функции управления и контроля.

Для организации их в единую структуру и связи с управлением более высокого уровня в качестве приоритетного решения рассматривается последовательная шина CAN Bus как основа массовой автоматизации для устройств, не требующих высокого трафика.

Эта привлекательность обусловлена следующим:

- экономичностью, качеством и совокупностью параметров CAN-устройств;
- богатым опытом применения этих устройств в ИЯФ СО РАН;
- разветвлённой номенклатурой модулей с шиной CAN Bus и адаптеров для этой шины.

Одним из предлагаемых решений организации ветви с CAN – устройствами может стать адаптер VME64 CAN, позволяя связать локальные контроллеры верхнего уровня и территориально разнесённые устройства с интерфейсом CAN Bus. Такая конфигурация показана на рис.3.7.3. Аналогичное решение использовано, например, на ускорительном комплексе SuperKEKB. Разумеется, что возможно использование и других адаптеров.

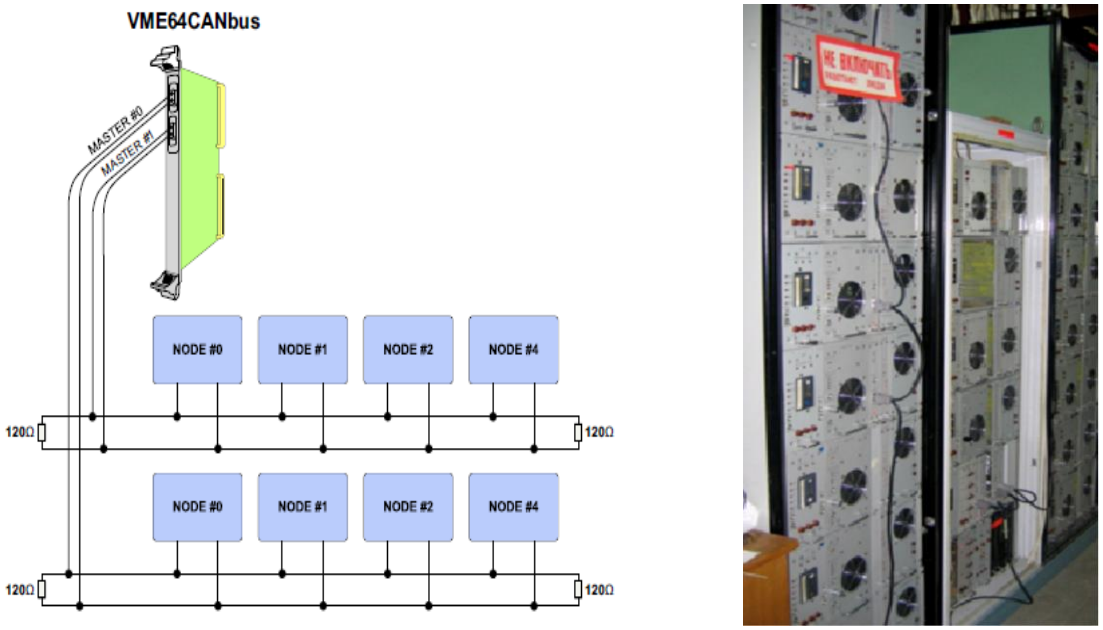

Рисунок 3.7.3. Слева – организация сети с CAN – устройствами. Справа – фотография стоек с источниками питания корректоров, управляемых от CAN – устройств

Специализированные контроллеры

Существует класс задач, решение которых требует индивидуального подхода, и которые не могут быть решены с помощью унифицированных аппаратных средств, описанных выше. Наиболее естественное решение для них – разработка специализированных контроллеров, как пример, разработанный в ИЯФ СО РАН специализированный контроллер для управления ВЧ-генераторами бустера ускорительного комплекса NICA в Дубне.

Для СУ комплекса СИ потребуется разработка специализированных контроллеров для широкополосной (100 – 200 Гц) системы стабилизации положения орбиты. Такая задача может быть решена за счет применения микросхем программируемой логики (FPGA) содержащими на борту широкий набор аппаратных ресурсов, включая мульти-гигабитные приёмопередатчики и блоки цифровой обработки сигналов.

Программируемые логические контроллеры для управления технологическими подсистемами комплекса

Наиболее естественным решением для технологических систем комплекса СИ видится применение программируемых логических контроллеров (PLC). На их основе успешно реализуются следующие подсистемы:

- вакуумная;
- температурного контроля;
- водяного охлаждения;
- блокировок;
- безопасности персонала (Human Safety);
- и т.п.

Ниже на рис.3.7.4 показан пример реализации подсистемы внешних блокировок мощных источников, питающих магнитные элементы.

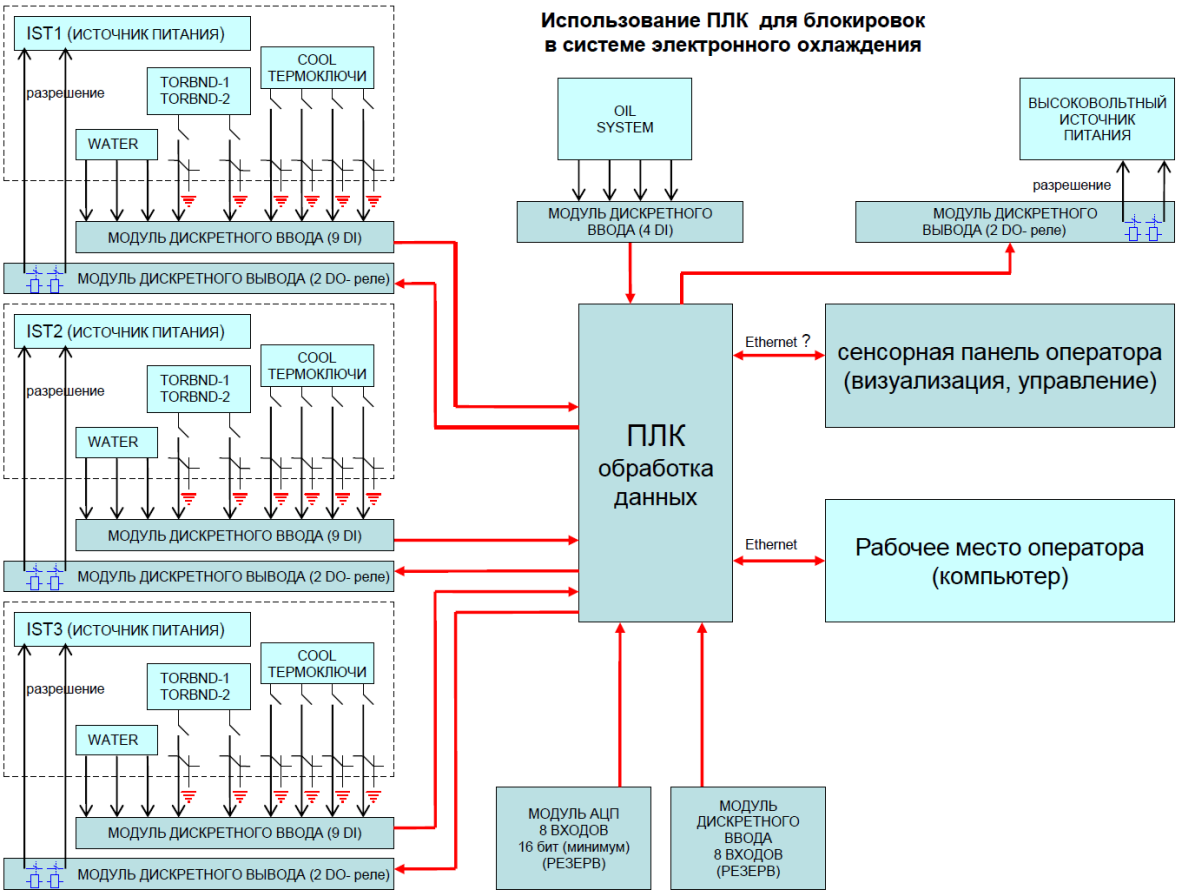

Рисунок 3.7.4. Реализация подсистемы блокировок мощных источников, питающих магнитные элементы

Программные средства

В качестве системного ПО для серверных машин предполагается использование свободной ОС Linux Ubuntu Server, для операторских машин – ОС Linux Ubuntu. На промышленных компьютерах и контроллерах крейтов планируется использовать ОС Linux Debian, или ОС Linux Ubuntu. Для машин экспериментальных станций предполагается поддержка ОС Linux, Windows. Использование Linux позволит воспользоваться большим количеством свободно распространяемых программ, в частности: NFS, NTP, Bind9, Postgres, MySQL, Nginx, Apache, Python, и пр.

Наиболее эффективным способом организации среднего уровня СУ видится использование виртуальных серверов и контейнеров под управлением Proxmox VE. Такой подход имеет ряд преимуществ:

- управление виртуальными серверами существенно проще и быстрее. Можно за несколько минут ввести в строй новый сервер или восстановить работоспособность из резервной копии. В том числе, возможна работа в режиме «горячего резерва»;
- эффективное разделение задач между серверами или контейнерами позволяет изолировать программы друг от друга, и, в случае ошибки, программа не повлияет на работу других программ;
- повышенную безопасность, так как несанкционированный доступ к одной виртуальной машине не приведёт к полному доступу к системе.

Опыт развёртывания подобной инфраструктуры уже использовался в институте на инжекционном комплексе, линейном индукционном ускорителе, комплексе ВЭПП-2000.

Программная платформа TANGO

Для реализации системы управления в качестве основной программной платформы будет использована TANGO. TANGO была создана для управления европейскими синхротронами и получила широкое распространение на целом ряде установок: ALBA, ESRF, MAX IV, Soleil. В качестве протокола нижнего уровня в TANGO используется CORBA, работающая поверх сетевого протокола TCP/IP. В качестве базы данных используется MySQL. Одним из основных свойств TANGO является мультиязычность и мультиплатформенность, в частности TANGO поддерживается на OS Linux и OS Windows распространённых версий, а для создания программ могут использоваться языки Pyhton, C++ и Java. Это позволит при необходимости легко интегрировать любые подсистемы в систему управления, в частности, подсистемы на ПЛК, EPICS, оборудование экспериментальных станций.

TANGO представляет широкий набор инструментов для реализации программ нижнего, среднего и верхнего уровней системы управления. На нижнем и среднем уровне для работы с устройствами или группами устройств реализуются специальные программы DeviceServer'ы, позволяющие работать с различными классами оборудования. Существует широкий набор готовых DeviceServer'ов для различного оборудования, а также возможно написание специализированных. Для облегчения работы программистов предоставлены кодогенераторы для различных языков.

Вся информация об устройствах и программных средствах TANGO сохраняется в базе данных TANGODB. Также предоставляются возможности для архивации данных, авторизации пользователей, ведения журнала. Для слежения за сервисами TANGO и мониторингом их работы предоставляются утилиты starter и astor.

На верхнем уровне предоставляются утилиты и виджеты для написания клиентских приложений на языках Java (TangoATK), C++ (QTango), Python (Taurus). Из предыдущего опыта, разумным видится иметь два класса клиентских приложений: «инженерные» и «операторские» программы. Инженерные программы предоставляют полный доступ ко всем режимам и уставкам оборудования, и используются при отладке и ремонте. Операторские же программы прячут ряд внутренних особенностей, и по возможности автоматизируют и абстрагируют работу с подсистемами. Следует отметить, что TANGO предоставляет автоматически сгенерированный инженерный интерфейс для любого DeviceServer'а.

Кроме того, планируется реализовать REST интерфейс из TANGO для web-приложений. Установившейся практикой на синхротронах является мониторинг, в том числе и удалённый, параметров пучка и излучения на рабочих станциях. На ведущих европейских синхротронах даже предоставляется услуга удалённого проведения эксперимента, когда образцы высылаются по почте, а наблюдать за проведением эксперимента и результатами можно он-лайн. Здесь достаточно актуальным будет разграничение прав доступа и введение правильной политики информационной безопасности.

В ИЯФ СО РАН есть опыт работы с TANGO в проектах линейного индукционного ускорителя, MAX-IV, ESRF, Tri Alpha Energy. Для многих разработанных устройств в формате VME64-BINP и CAN-BUS уже написаны DeviceServer-ы, а также инженерные программы. ИЯФ СО РАН имеет тесные связи с сообществом TANGO, а для реализации проекта синхротрона следует рассмотреть возможность вхождения в международную коллаборацию TANGO.

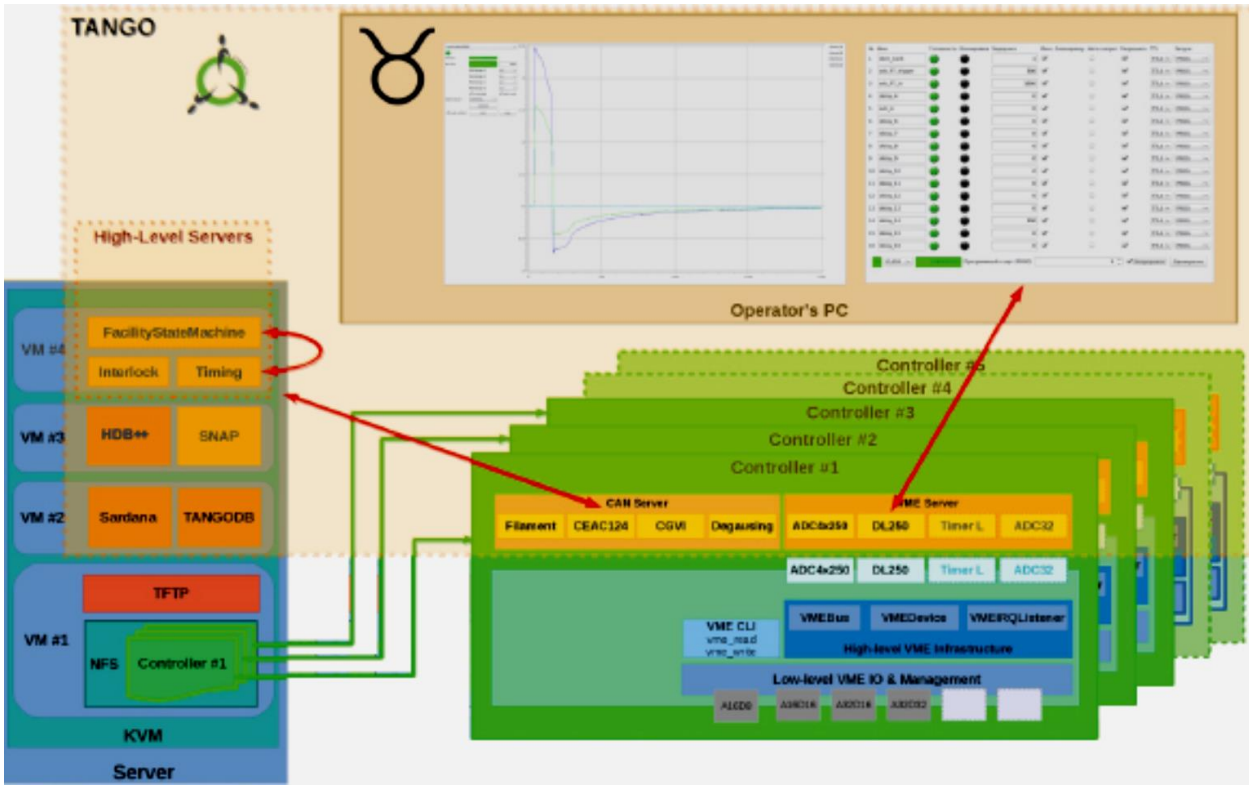

Рисунок 3.7.1. Архитектура программной части установки линейного индукционного ускорителя, как пример использования платформы TANGO

Программное обеспечение рабочих станций

Для автоматизации исследований на рабочих станциях планируется применить программный комплекс SARDANA, который удачно сочетается с платформой TANGO. Он широко применяется на каналах СИ синхротронов ALBA, DESY, Max IV, Solaris, ESRF и др. Пакет SARDANA является свободным ПО с открытым исходным кодом, и в настоящее время начато освоение пакета в ИЯФ СО РАН. Кроме того, налажен тесный рабочий контакт с командой его разработчиков, т.к. сотрудники ИЯФ СО РАН участвуют в модернизации библиотеки TAURUS, входящей в его состав.

SARDANA позволяет учёному-экспериментатору задать последовательность проведения эксперимента при помощи средства написания скриптов SPOCK. Преимуществом этого средства является простота языка, основанного на широко распространённом в научной среде языке PYTHON, что позволяет проводящему эксперимент учёному быстро с ним освоиться и перейти к своей непосредственной задаче. В SARDANA уже присутствует поддержка многих устройств, использующихся на рабочих станциях: подвижки, таймеры, счётчики, дифрактометры, гониометры, и т. д., а добавление поддержки новых устройств не представляет большой трудности. На рис.3.7.2 показан пример рабочего окна экспериментатора.

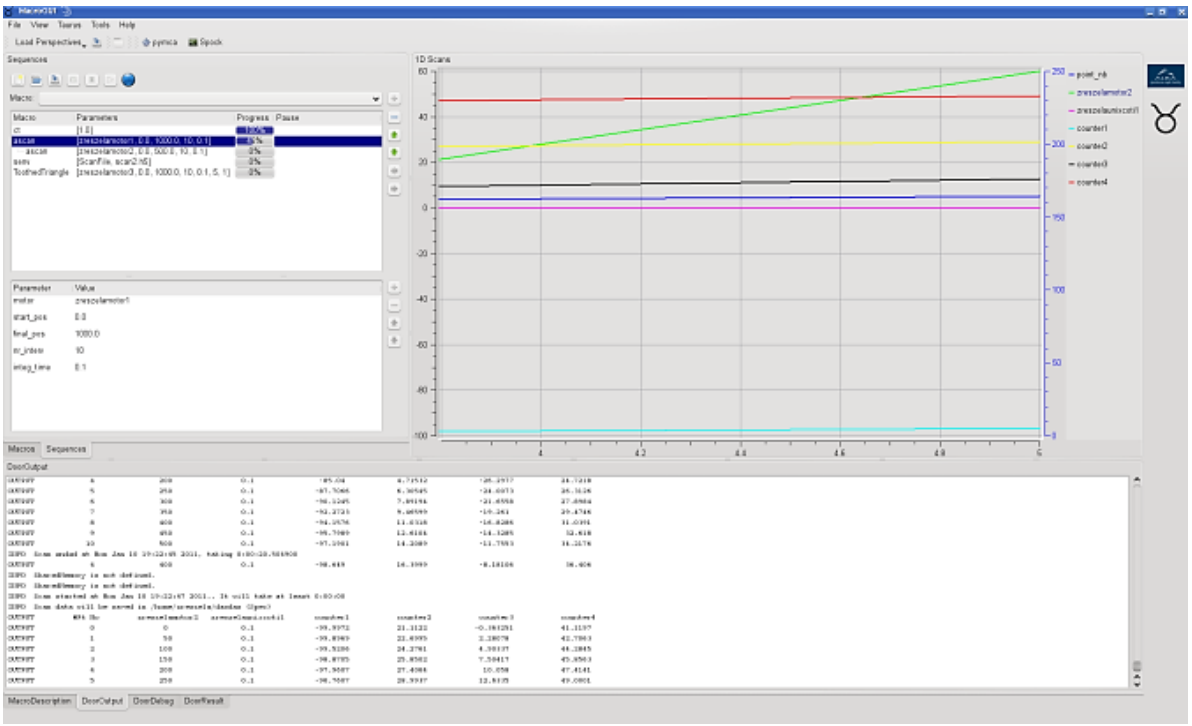

Рисунок 3.7.2. Пример рабочего окна при проведении эксперимента в SARDANA

Отдельно стоит обратить внимание на хранение результатов проведённых экспериментов. В качестве формата для их хранения предлагается использовать NeXus – международный стандарт, специально созданный для облегчения анализа и визуализации данных, полученных в ходе нейтронных, рентгенографических и мюонных исследований. Для работы с этим форматом есть большое количество свободно распространяемых утилит, а он сам используется на следующих установках: ISIS, APS, Diamond, ESRF, Alba, SLS, ILL, SNS, SINQ, и др. Целесообразным видится также организация централизованного архива данных экспериментов с разграничением прав доступа.

4. Инжекционный комплекс

4. 1. Структура и основные параметры

Накопитель электронов будет снабжаться сгустками электронов из инжекционного комплекса, состоящего из линейного ускорителя на 200 МэВ и бустерного синхротрона на полную энергию 3 ГэВ. Аналогом предлагаемого бустера является бустер, спроектированный и изготовленный ИЯФ СО РАН для источника СИ NSLS-II в Брукхевенской Национальной Лаборатории (США). Линак на 200 МэВ будет сделан на основе разработок и технологий ИЯФ СО РАН, примененных недавно при создании инжекционного комплекса ВЭПП-5, который включает в себя два линака на 300МэВ и 500МэВ.

Такой инжекционный комплекс полностью удовлетворит потребность накопительного кольца в сгустках электронов, а имеющиеся разработки и технологии позволять создать и запустить источник СИ ЦКП «СКИФ» нового поколения в срок.

Инжекционный комплекс состоит из:

- линейного ускорителя на 200 МэВ;
- транспортного канала из линейного ускорителя в бустер;
- бустера на полную энергию;
- транспортного канала из бустера в накопитель электронов.

Основные параметры инжекционного комплекса приведены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1. Основные параметры инжекционного комплекса

Энергия инжекции в основное кольцо	3 ГэВ
Максимальная энергия инжекции	3.15 ГэВ
Частота инжекции в накопитель	1 Гц
Время между сгустками	5.6 нс
Количество сгустков электронов в поезде	до 55
Заряд в одном сгустке	до 0.24 нКл
Максимальный заряд в поезде	13 нКл
Время заполнения накопителя электронов от 0 до 400 мА	Не более 1 минуты
Эффективность транспорта заряда от пушки до накопителя	Не менее 90%
Горизонтальный эмиттанс при 3 ГэВ	< 40 нм*рад
Разброс по энергии	< 0.1%
Время незапланированных остановок в год	Не более 0.5%

4.2. Линейный ускоритель

Схема и основные параметры линейного ускорителя

Линейный ускоритель предназначен для формирования последовательности сгустков электронов требуемой интенсивности и требуемой модуляции с энергией 200 МэВ. Требования на интенсивность и модуляцию зависят от режима и моды накопителя электронов.

Пользователям источника СИ ЦКП «СКИФ» для своих исследований могут потребоваться различные моды заполнения накопителя электронов сгустками. Основной модой на современных источниках СИ является заполнение всех возможных сепаратрис накопителя электронов. В случае ЦКП «СКИФ», в основной моде в накопителе электронов будут вращаться 255 сгустков электронов через 5.6 нс. Однако, могут потребоваться и другие моды. Например, на источнике СИ DIAMOND (Англия) пользователям предлагается 5 мод: http://www.diamond.ac.uk/Science/Machine.html.

Чтобы иметь возможность предоставить пользователям любую моду требуется, чтобы линак мог выдавать последовательность сгустков с заданным распределением заряда в каждом сгустке. Основные параметры проектируемого линака приведены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1. Основные параметры линейного ускорителя

Энергия электронов	200 МэВ
Максимальная энергия	210 МэВ
Частота выстрелов	1 Гц
Длина последовательностей сгустков	до 310 нс
Время между сгустками	5.6 нс
Количество сгустков электронов в поезде	до 55
Максимальный заряд в поезде	15 нКл
Заряд в одном сгустке	0.27 нКл
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ	150 нм*рад
Разброс по энергии на 200 МэВ	Не более 1% (rms)
Время незапланированных остановок в год	Не более 0.5%

Для выполнения требований, предъявляемых к линаку, предлагается создать линак по схеме, показанной на рис.4.2.1.

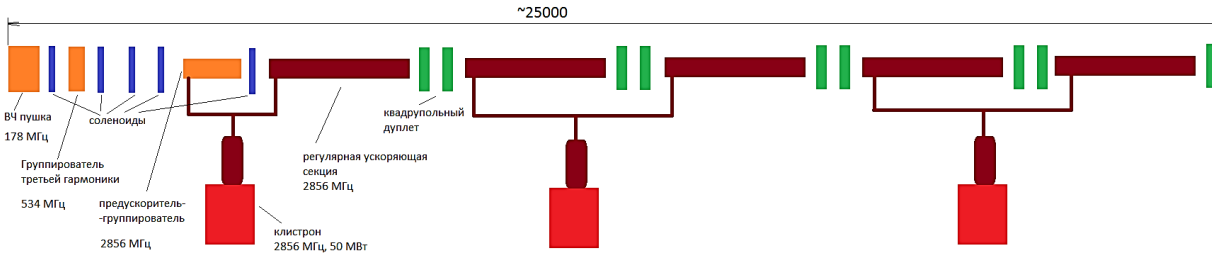

Рисунок 4.2.1. Схема линейного ускорителя на 200 МэВ

Основные элементы и их краткие описания приводятся в таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2. Основные элементы линейного ускорителя

Название	Описание	Кол-во
Источник электронов	СВЧ пушка на основе термо-катодного сеточного узла частота 178.5 МГц,	1
Группирующий резонатор 1	Резонатор с частотой 535.5 МГц	1
Группирователь-предускоритель	Структура с параллельной связью с частотой 2856 МГц	1
Ускоряющая структура	Частота 2856 МГц, длина 3 м, структура на бегущей волне с видом колебания 2π/3	5
Источник мощности резонатора СВЧ пушки	Частота 178.5 МГц, мощность 1 МВт	1
Модулятор источника электронов		1
Источник СВЧ мощности резонатора группирователя	Частота 535.5 МГц, мощность 10 кВт	1
Клистрон	Частота 2856 МГц, мощность 50 МВт	3
Предусилитель мощности для клистрона	Частота 2856, мощность 500 Вт	3
Модулятор клистрона	350 кВ высокое напряжение, 120 МВт импульсная мощность	3
Термостабилизация	~50 КВт	1
Соленоидальные фокусирующие элементы	Соленоид с максимальным полем 4 Гс	5
Квадрупольные линзы	Линзы регулярных ускоряющих структур	10

Источник электронов

Источник электронов предполагается сконструировать на основе СВЧ резонатора с сеточно управляемым термо-катодом. В этом случае возможно обеспечить модуляцию тока инжекции с частотой около 178.5 МГц, используя резонатор на данную частоту.

Работы с термо-катодными сеточными ВЧ пушками 90 и 100 МГц показывают надежную работу в непрерывном режиме, с зарядом сгустков больше одного нано кулона при энергии до 400 кэВ и частотой повторения до 100 МГц.

Из-за низкой средней мощности ВЧ потерь в стенках резонатора ВЧ пушки в импульсном режиме работы для синхротрона, упрощается конструкция ее охлаждения. Кроме того, в импульсном режиме можно увеличить интенсивность ВЧ поля в пушке, при которой поверхностная электрическая напряженность ВЧ поля повышается в 10 раз, до 50 МВ/м. Из-за этого проще получить требуемые характеристики электронного пучка.

Длительность сгустков из катодно-сеточного узла в режиме ВЧ модуляции с хорошим качеством, как показывает опыт, может быть порядка 1/6 от периода ВЧ, т.е. 0.5 нс. Поэтому в инжекторе должна применяться группировка сгустков для укорочения их длины до значений, необходимых для ускорения в регулярных ускоряющих секций с частотой 2856 МГц (период 350 пс).

Геометрия ВЧ резонатора пушки обеспечивает определенную, относительно низкую напряженность электрического ВЧ поля на сетке, соединенной со стенкой в центре резонатора, и максимальную напряженность электрического поля на поверхности резонатора, не превышающую 50 МВ/м (аналогичную резонаторам ИЛУ). Это достигается применением электрода с вогнутой задней стенкой в ускоряющем промежутке с термо-катодом в центре (см. рис.4.2.2). Кроме того, вогнутая задняя стенка резонатора создает сильный фокусирующий эффект, необходимый для минимизации поперечного эмиттанса. Создаваемые ею темновые токи автоэмиссии с краев не попадают в канал для пучка и не могут с ним смешиваться, обеспечивая этим сохранение высокого качества сгустков.

Напряженность поля на сетке, в идеальном случае, должна быть равна напряженности электрического поля в промежутке катод-сетка, для обеспечения ламинарности электронного потока через сетку или минимального эмиттанса. Так при отпирающем напряжении 10 В и зазоре катод-сетка 80 мкм, эта напряженность равна 0.125 МВ/м. Если учесть, что фаза эмиссии в режиме группировки сгустков достаточно мала, например, 11°, то амплитудная ВЧ напряженность на сетке должна быть 0.125/sin(11°) = 0.66 МВ/м. Имеется в виду фаза синусоидального напряжения в резонаторе ВЧ пушки в момент эмиссии центра сгустка. Тем не менее, расчеты

показывают, что влияние пространственного заряда на эмиттанс в ВЧ пушке в разы сильнее (при плотности заряда около 1 нКл/см^2), чем влияние упомянутого эффекта, поэтому напряженность на катоде может быть несколько больше чем 0.66 МВ/м.

Кроме того, резонатор должен обеспечить максимально возможную энергию сгустков при ограниченной длине дрейфового промежутка (здесь принято ≈ 2-3 м), на котором происходит продольная группировка. Анализ показывает, что для этого необходима определенная величина ускоряющего зазора ВЧ пушки. В данном случае необходимо иметь длину ускоряющего зазора ВЧ пушки не больше 50 мм. Данный ускоряющий зазор в резонаторе сформирован при помощи выступающего «носа» на противоположной от катода стенке (рис.4.2.2). Максимум ВЧ электрического поля на нем не превышает 50 МВ/м. В таблице 4.2.3 приведены характеристики резонатора.

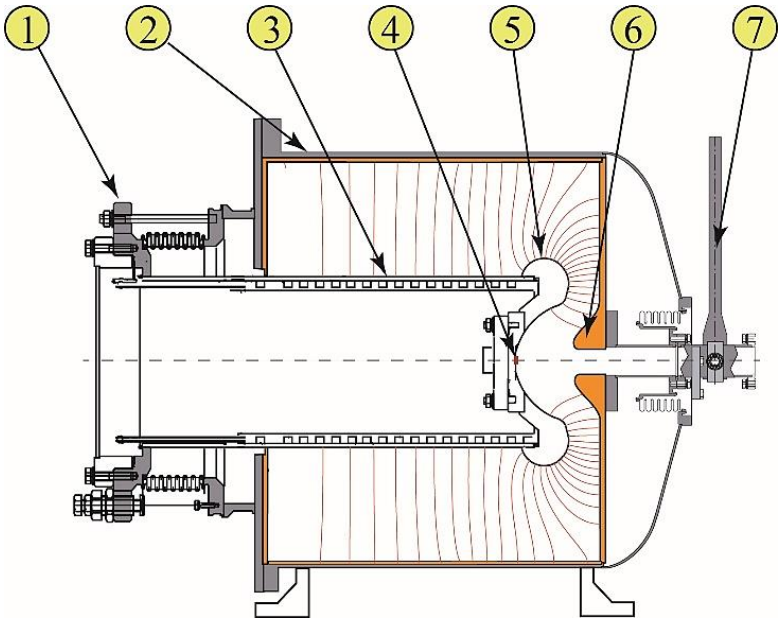

Рисунок 4.2.2. Геометрия ВЧ резонатора пушки.
1 - Узел крепления вставки; 2 - Корпус резонатора; 3 - Вставка; 4 - Катодно-сеточный узел; 5 - Электрод; 6 - «Нос»; 7 - Механизм перестройки частоты.

Таблица 4.2.3. Характеристики ВЧ резонатора пушки

Резонансная частота, МГц	178.5
Напряжение резонатора, кВ	822
Макс. Электрическое поле, МВ/м	50
Электрическое поле на сетке, МВ/м	5.45
Характеристическое сопротивление, Ом	32.5
Добротность	10300
Импульсная мощность, кВт	1005

Корпус резонатора может быть сделан биметаллическим с диаметром 340 мм. Внешняя обечайка из нержавеющей стали спаивается с внутренней медной обечайкой в термо-вакуумной печи. Частота перестраивается прогибом передней медной стенки при помощи механизма с шаговым двигателем (рис.4.2.2).

Катод данной ВЧ пушки, должен иметь наименьший диаметр для минимизации эмиттанса, т.к. эмитттанс катода прямо пропорционален его диаметру. Наиболее подходящими для этой цели являются катодные узлы фирмы EIMAC с площадью катода 10 мм2 и эмиссией 3 А - Y809 или YU180. На Новосибирском заводе НЭВЗ производятся аналогичные катодно-сеточные узлы для металлокерамических ламп 6С45К.

Ограничение на заряд в сгустках в ВЧ пушке с сеточным термо-катодом оказывает величина отпирающего импульса, формируемого модулятором. С учетом этого, были проведены предварительные оценки получаемого пучка при различных отпирающих напряжениях 100, 130, 160 В, которые доступны для генерирования имеющимися ВЧ транзисторами в модуляторе. На рис.4.2.3. представлена зависимость величины заряда от запирающего потенциала на сетке для катода 10 мм^2 для выбранных импульсов. Значения менее 20 В запирающего потенциала приводят к появлению темнового тока. Из рис.4.2.3. видно, что может быть обеспечен заряд сгустка пучка со значением 270 пКл, который необходим с учетом требований к линаку, при потенциале на сетке в районе 25 В и отпирающем напряжении 160 В.

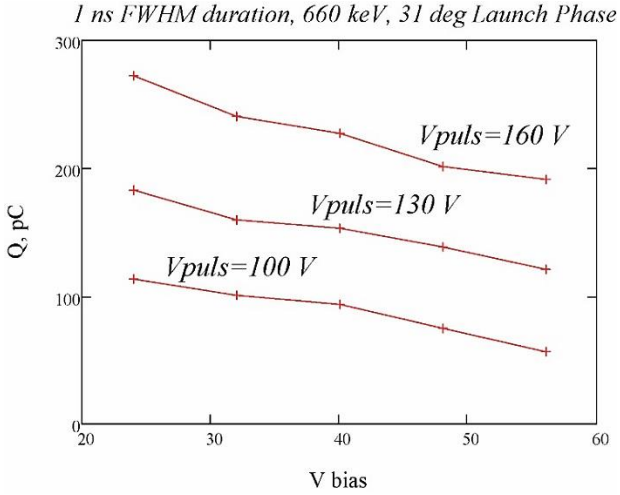

Рисунок 4.2.3. Зависимость величины заряда от запирающего потенциала на сетке

Для инжекции в регулярные ускоряющие секции с частотой 2856 МГц пучок, получаемый из источника электронов, должен быть сгруппирован по длине. При этом его полную длительность желательно иметь не более 10 пс, что позволит обеспечить

энергетический разброс на выходе инжектора порядка 1%. Группирующий эффект может быть обеспечен уже в источнике электронов при смещении фазы эмиссии сгустков ниже фазы ВЧ резонатора, обеспечивающей максимальную энергию пучка. В этом случае создается коррелированное распределение скоростей частиц, которое обеспечивает продольную группировку на дрейфовом промежутке. На рис.4.2.4 представлены среднеквадратичные (r.m.s.) длительности сгруппированных сгустков в конце дрейфового промежутка 2.5 м в зависимости от заряда выбранных сгустков.

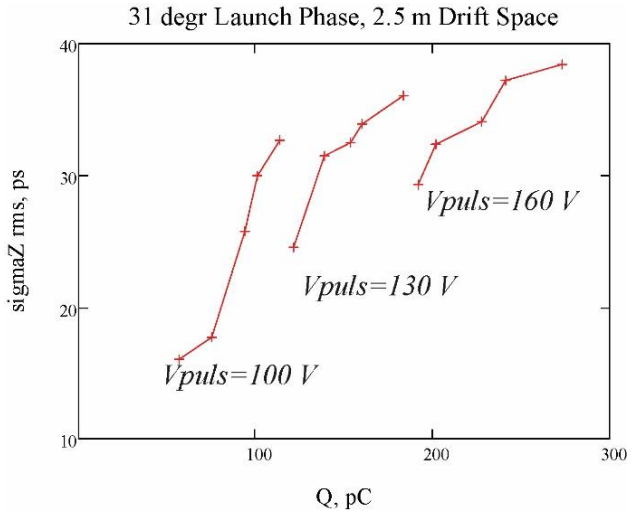

Рисунок 4.2.4. Длительность сгруппированных сгустков при длине дрейфа 2.5 м

Из данных, показанных на рис.4.2.4 видно, что полная длительность пучка значительно превышает 10 пс. Таким образом, необходимо использовать дополнительный группирующий резонатор после источника электронов, рассчитанный на частоту третьей гармоники 534 МГц, что позволяет получить коррелированное распределение скоростей частиц, близкое к равномерному, а значит увеличить эффективность группировки. На рис.4.2.5 показаны оценочные зависимости r.m.s. длины пучка с зарядом 100 пКл без резонатора третьей гармоники и при его использовании. Видно, что при дополнительном резонаторе r.m.s. длительность пучка можно уменьшить до 3.5 пс, что дает полную длину пучка в районе 12 пс. При этом средняя энергия пучка после группировки уменьшается до 450 кэВ.

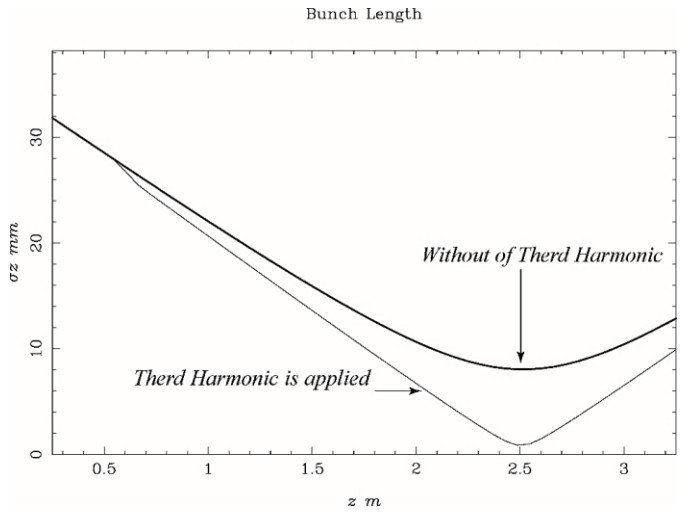

Рисунок 4.2.5. Зависимости r.m.s. длины пучка без резонатора третьей гармоники и при его использовании

Предускоритель-группирователь

Предлагается использовать дополнительную ускоряющую структуру с частотой 2856 МГц, которая будет иметь роль предускорителя и дополнительного группирователя. После нее пучок электронов должен обладать релятивистской энергией. Такой пучок можно инжектировать в последующие регулярные ускоряющие структуры, расположенные на удалении от инжектора, например, расположенные в соседнем зале или за радиационной защитой. Такая схема позволит независимо оптимизировать работу системы формирования релятивистского пучка и системы последующего регулярного ускорения.

Предускоритель-группирователь предлагается выполнить на основе ускоряющей структуры с параллельной связью с частотой 2856 МГц, разработанной в ИЯФ СО РАН совместно с Институтом химической кинетики и горения СО РАН. Ее вид представлен на рис.4.2.6. Одним из достоинств данной структуры является возможность варьировать длины ускоряющих резонаторов и мощность, поступающую в них, в широком диапазоне. Осуществляется это за счет отсутствия связи по электромагнитному полю между ускоряющими резонаторами и наличия индивидуальных возбуждающих отверстий между каждым ускоряющим и возбуждающим резонаторами. Изменяя данные отверстия можно обеспечить практически любой поток мощности в ускоряющие резонаторы, а значит и ускоряющее поле. Перечисленные особенности наилучшим образом подходят для достижения адиабатического ускорения и группировки частиц, начальная энергия которых не достигает релятивистских значений. На рис.4.2.7 показан прототип изготовленной такой структуры, состоящий из 9 ускоряющих резонаторов.

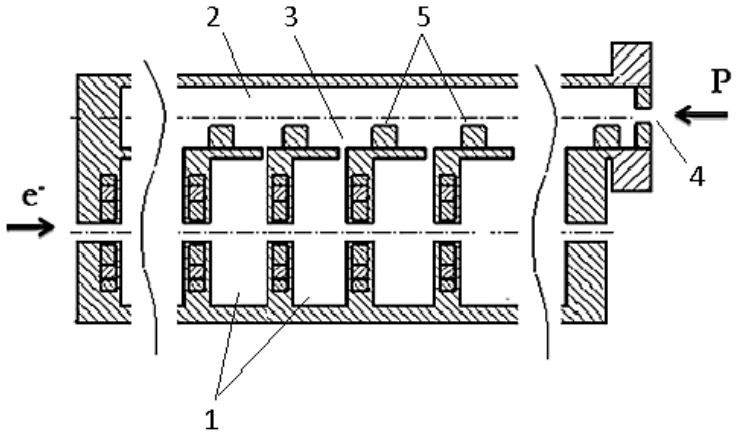

Рисунок 4.2.6. Ускоряющая структура с параллельной связью:
1 - набор ускоряющих резонаторов, 2 – общий возбуждающий резонатор;
3- индивидуальные отверстия связи ускоряющих резонаторов; 4- диафрагма связи с внешней линией; 5 – настроечные реактивные элементы возбуждающего резонатора

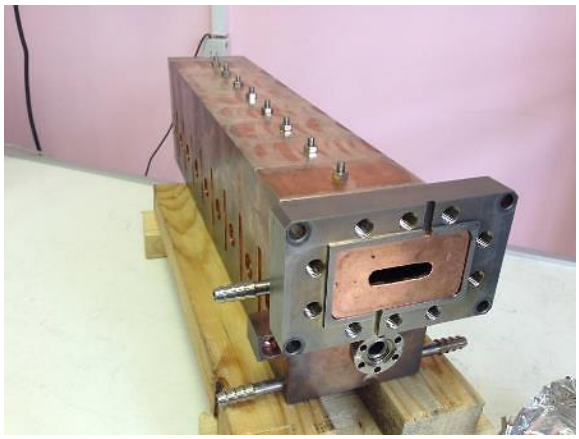

Рисунок 4.2.7. Изготовленный прототип ускоряющей структуры с параллельной связью с частотой 2856 МГц

Предварительные оценки показывают, что с помощью предложенной структуры можно получать пучки электронов с полной длительностью в районе 4 пс и энергией в районе 3.5 МэВ при мощности генератора около 5 МВт. Такой пучок можно считать полностью сформированным и релятивистским, а, значит, он может быть инжектирован в регулярную ускоряющую структуру.

Регулярные ускоряющие секции

Основное ускорение до 200 МэВ будет происходить в ускоряющих секциях на основе диафрагмированного волновода, работающих в режиме бегущей волны с постоянным импедансом, которые давно и успешно используются в ИЯФ СО РАН на инжекционном комплексе ВЭПП-5. Предполагается использовать секции длиной 3 м с модой колебания $2\pi/3$ и клистроны в качестве источников СВЧ мощности. Параметры секций представлены в таблице 4.2.4. При мощности клистрона 50 МВт, которую

позволяет получить, например, клистрон Toshiba E3730A, при работе на две ускоряющие секции полный прирост энергии составит около 75 МэВ. При работе одного клистрона (мощность 50 МВт) на одну ускоряющую секцию, прирост энергии будет равным 60 МэВ. Таким образом, для достижения энергии пучка 200 МэВ можно использовать 3 клистрона и 5 регулярных ускоряющих секций длиной по 3 м. Стоит отметить, что модуляторы для клистронов также имеют аналогию с модуляторами комплекса ВЭПП-5, что обеспечивает больший опыт работы с ними и возможность производства в ИЯФ СО РАН.

Таблица 4.2.4. Параметры ускоряющей секции

Параметры	Значения
Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1.32 \cdot 10^4$
Групповая скорость	$0.021 \cdot C$
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Постоянная времени ускоряющей структуры (УС)	1.47 мкс
Коэффициент затухания в УС по полю	0.108 1/м
Параметр затухания	0.316
Время заполнения УС	0.465 мкс
Период	34.98 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.8 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм
Коэффициент перенапряжения	1.7

4.3. Бустерный синхротрон

Бустерный синхротрон предназначен для ускорения пучка электронов до проектной энергии основного кольца (3 ГэВ).

Основные параметры бустера и требования к его работе приведены в таблице 4.3.1. Общий вид показан на рисунке 4.3.1.

Таблица 4.3.1. Основные параметры бустера и требования к его работе.

Периметр кольца	159 метров
Энергия электронов на впуске	200 МэВ
Энергия электронов на выпуске	3 ГэВ
Частота работы	1 Гц
Частота ВЧ	178.5 МГц
Время не запланированных остановок в год	Не более 0.4% (или 24 часа в год)
Максимальный заряд	15 нКл
Эффективность пропускания заряда выпуск/впуск	>75%

ВЧ-систему накопителя ЦКП «СКИФ» предполагается сделать на частоте 178.5 МГц. Периметр бустера согласован с длиной волны, применяемой ВЧ-системы. При частоте 178.5 МГц, периметр бустера вместит 95 сепаратрис и составит 159 метра. При этом подразумевается, что периметр накопителя ровно в 3 раза больше, и составляет 477 м, вмещая 285 сепаратрис.

Частота работы бустера равна 1 Гц, однако в проект заложена возможность модернизации до 2 Гц при необходимости.

Структура, оптические функции и таблица параметров

На рис.4.3.2 показана схема бустера. Магнитная структура бустера включает четыре квадранта. Каждый квадрант состоит из пяти регулярных ячеек и двух модифицированных ячеек на концах квадранта для подавления дисперсии. Такая структура обеспечивает довольно низкий горизонтальный эмиттанс в 37.4 нм*рад при энергии выпуска 3 ГэВ.

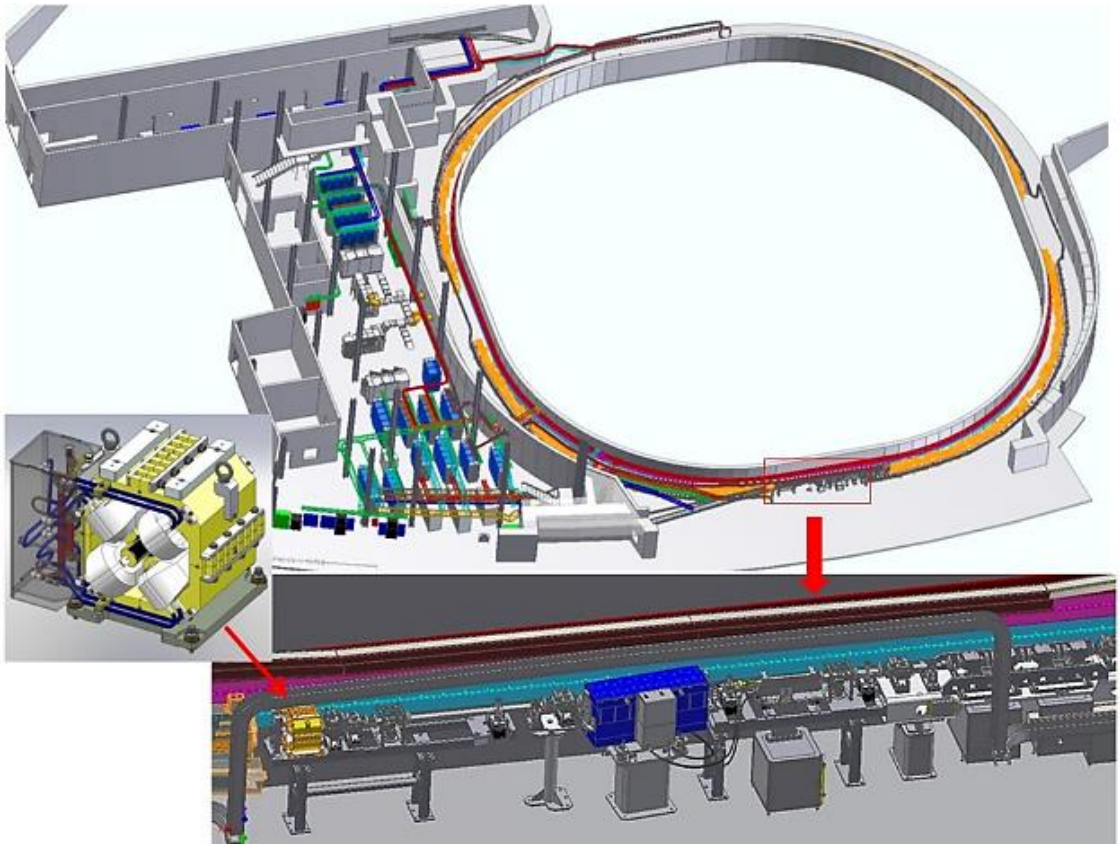

Рисунок 4.3.1. Внешний вид бустерного синхротрона источника СИ ЦКП «СКИФ»

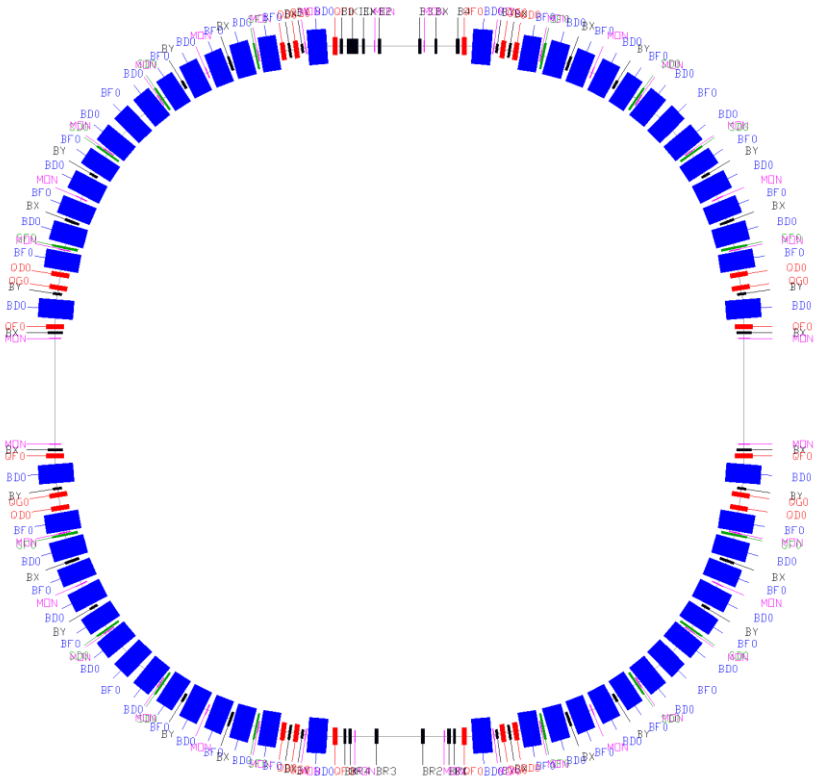

Рисунок 4.3.2. Принципиальная схема бустерного синхротрона

Более подробно параметры бустера представлены в таблице 4.3.2.

Таблица 4.3.2. Параметры бустера.

Энергия	200 МэВ	3 ГэВ
Число периодов	4	
Длина окружности, м	159	
Частота повторения, Гц	1 (2 Hz)	
Количество сгустков	1; 80-150	
Период обращения, нс	532	
ВЧ частота, МГц	178.5	
Количество сепаратрис	95	
ВЧ напряжение, МэВ	0.2	1.2
Синхротронная частота, кГц	36.4	20.9
ВЧ акцептанс, εRF, %	1.65	0.54
Бетатронные частоты: ν_x / ν_y	9.6455 / 3.4105	
Максимальная/минимальная структурные функции $\beta_{xmax}/\beta_{xmin}$, м $\beta_{ymax}/\beta_{ymin}$, м η_{xmax}/η_{xmin}, м Бета-функция инжекция/экстракция β_x/β_y, м Дисперсия впуск/выпуск η_x, м	 9.32/1.04 26.26/2.25 0.393/0.074 6.537/4.660 0.135	
Естественный хроматизм: ξ_x / ξ_y	–9.5/–13.5	
Корректированный хроматизм: ξ_x / ξ_y	1.25 / 2.05	
Коэффициент уплотнения орбит, α	0.00882	
Геометрический эмиттанс (линак) ($4 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_x'$)	$1.50 \cdot 10^{-7}$	-
Разброс энергии (линак), σ_E/E	$<1 \cdot 10^{-2}$	-
Горизонтальный эмиттанс, ε_x, мрад	$0.166 \cdot 10^{-9}$	$37.4 \cdot 10^{-9}$
Разброс энергии, σ_E/E	$0.55 \cdot 10^{-4}$	$8.31 \cdot 10^{-4}$
Потери энергии за оборот, U_0, кэВ	0.0135	685.8
Времена затухания: (τ_x, τ_y, τ_s)	(15.6, 15.6, 7.8) с	(4.62, 4.62, 2.31) мс
Дампинг соотношение: (J_x, J_y, J_s)	(1.001, 1.000, 1.999)	

Каждый квадрант содержит следующие магнитные элементы:

- 8 комбинированных дефокусирующих дипольных магнитов (BD) с углом поворота 8.39°;
- комбинированных фокусирующих магнитов (BF) с углом поворота 3.27°. Оба диполя представляют собой Н-образные изогнутые магниты с параллельными полюсами. Для компенсации хроматизма в оба диполя введён секступольный компонент;
- квадрупольных магнитов для достижения нужной рабочей точки;
- 4 секступольных магнита двух типов для большей гибкости при компенсации хроматизма.

Основные параметры магнитов представлены в таблице 4.3.3.

Таблица 4.3.3. Основные параметры бустерных магнитов

Диполи						
Тип/номер	Длина, м	θ, deg	θ in, deg	θ out, deg	K_1, 1/m^2	K_2, 1/m^3
BF/28	1.24	3.26732	1.63366	1.63366	0.82	3.6
BD/32	1.3	8.39110	4.19555	4.19555	-0.55509	-4.3
Квадруполи						
QF/8	0.3				2.0425	
QD/8	0.3				-1.5014	
QG/8	0.3				1.3361	
Секступоли						
SF/8	0.12					40
SD/8	0.12					–40

Две длинных противоположных прямые секции зарезервированы для устройств впуска и выпуска, ещё одна прямая секция для ВЧ-резонаторов и оставшаяся секция – для устройств диагностики пучка.

На рис.4.3.3 представлены бетатронная и дисперсная функции для магнитного квадранта (MAD моделирование). Рабочая точка на диаграмме бетатронных частот с резонансами (до 4-го порядка) показаны на рис.4.3.4.

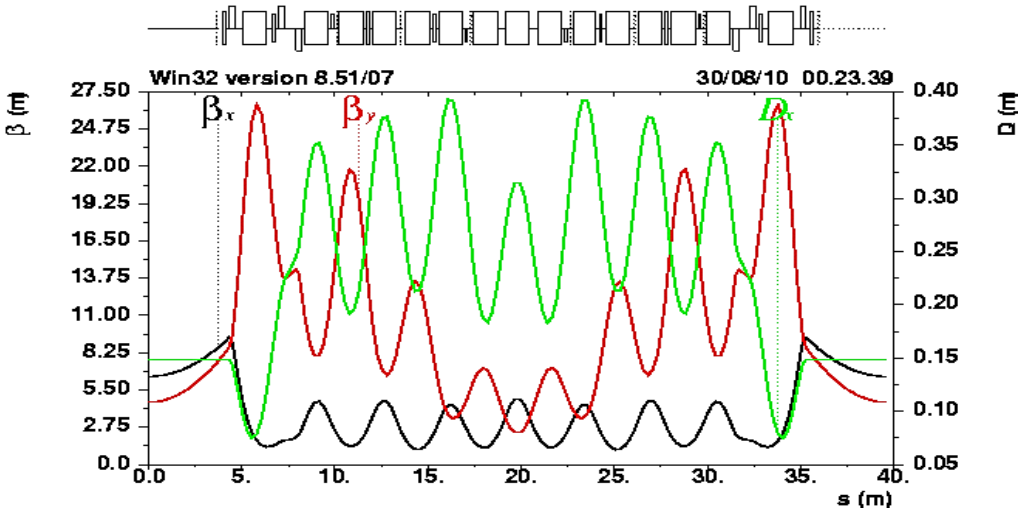

Рисунок 4.3.4. Структурные функции для ¼ бустера

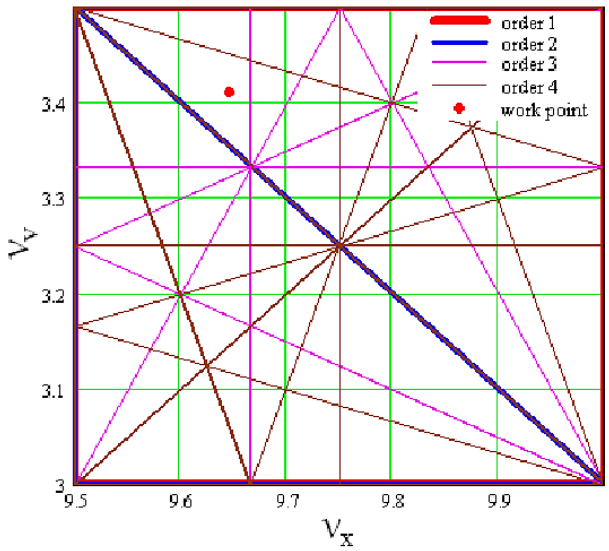

Рисунок 4.3.5. Рабочая точка и основные бетатронные резонансы

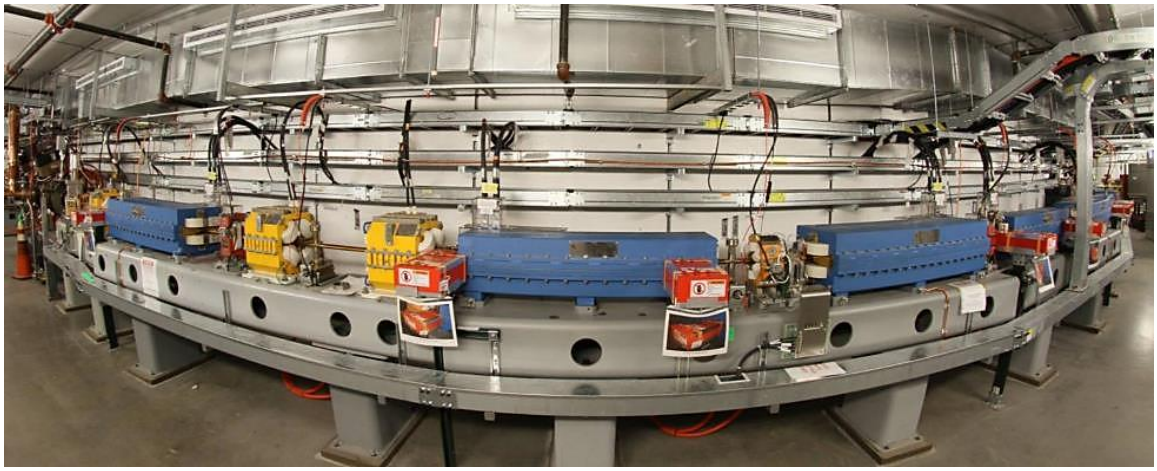

Рисунок 4.3.6. Фотография небольшого кусочка сегмента бустера

Магнитная система

Основные параметры диполей

Каждый дипольный магнит бустера содержит в себе квадрупольную и секступольную компоненту. В бустере имеется 28 дипольных магнитов BF с фокусировкой по горизонтали и 32 дипольных магнита BD с фокусировкой по вертикале – рис.4.3.7.

Все 28 дипольных магнита BF запитываются последовательно от одного источника питания. Диполи BD имеют два источника питания. К каждому источнику питания подсоединены по 16 диполей BD. Основные параметры – в таблице 4.3.4.

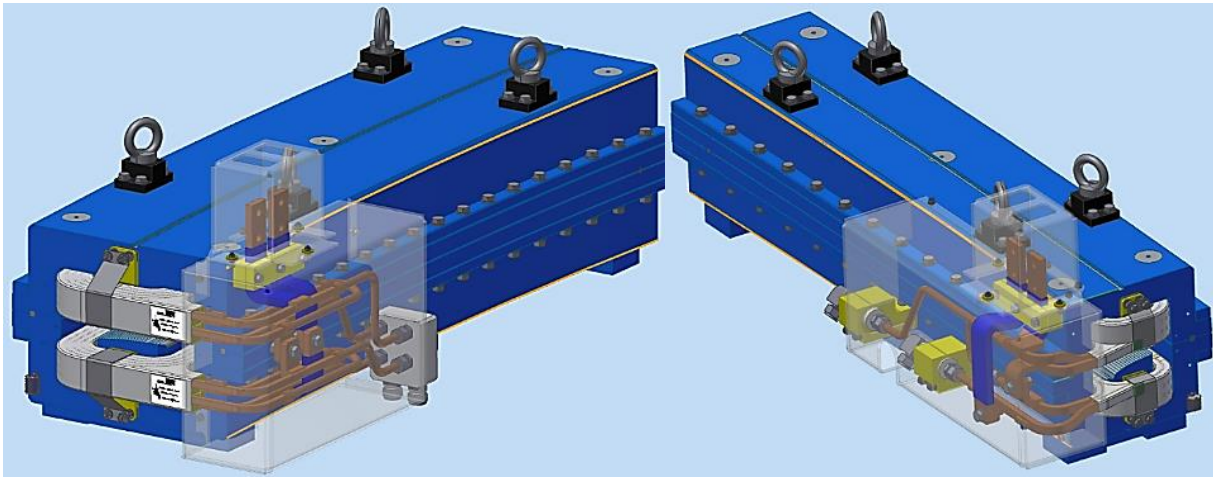

Рисунок 4.3.7. Слева - дипольный магнит BD, справа - дипольный магнит BF

Таблица 4.3.4. Основные параметры диполей

Параметры	Размер-ность	BF диполь			BD диполь		
Количество магнитов		28			32		
Угол поворота		3.26732°			8.3911°		
Радиус поворота	м	21.74467			8.87661		
Длина магнитной линии	м	1.24			1.30		
Пиковое (выпуск) поле	Т	0.46021			1.12734		
Поле при инжекции	Т	0.03068			0.07516		
Зазор	мм	28			26		
Пиковый ток Imax.	А	861.66			741.65		
Активное сопротивление	мОм	3.8			19.5		
Общая индуктивность	мГн	1.1			9.58		
Частота работы	Гц	1	2	Max	1	2	Max
Скважность $K_{aver} = P_{aver} / P_{max}$		0.367	0.393	1	0.367	0.393	1

Среднее мощность	Вт	1033	1106	2835	3932	4212	10862
Перепад температуры воды	°C	2.3	2.5	6.4	4.4	4.7	12
Расход воды	л/мин	6.5			13		
Вес магнита	ton	0.75			1.2		

Основные параметры квадрупольных магнитов

На бустере используются 24 квадрупольных магнита. Они объединены в 3 семейства (QF, QD, QG) по 8 штук в каждом. Каждое семейство запитывается одним источником питания. Общий вид – на рис.4.3.8, основные параметры – таблица 4.3.5.

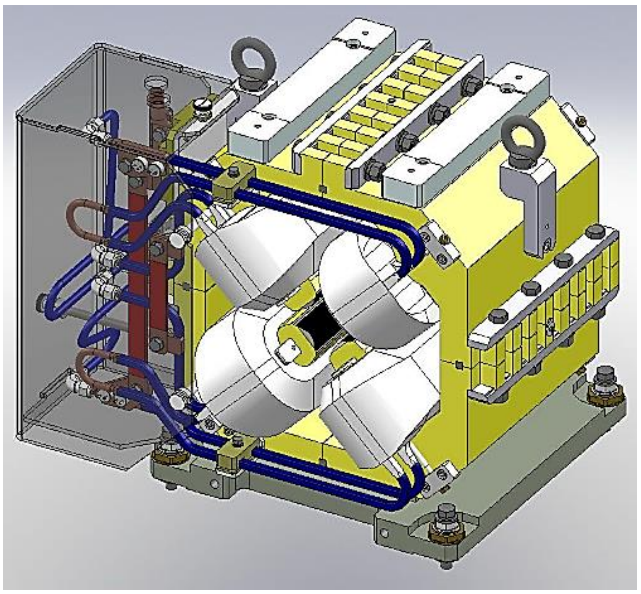

Рисунок 4.3.8. Общий вид квадрупольного магнита

Таблица 4.3.5. Основные параметры квадрупольных магнитов

		QF	QD	QG
Кол-во магнитов	-	8	8	8
Максимальный относительный градиент поля	$м^{-2}$	2.042	-1.501	1.336
Максимальный градиент поля	Т/м	20.42	-15.01	13.36
Максимальное поле в районе полюса	Т	0.511	-0.375	0.334
Апертура	мм	50		
Длина ярма магнита	мм	280		
Эффективная длина ярма магнита	мм	300		

Однородность поля	-	$\pm 3.25 \cdot 10^{-3}$		
Область хорошего поля	мм	40		
Максимальный ток	А	166.9	118	105
Перепад давления на магнит	МПа	0.41		
Скорость потока охлаждающей воды	л/мин	0.65		
Сопротивление катушек магнита при 23°С	мОм	36.8		
Потери мощности для магнитat (E=3 ГэВ, 1 Гц, k=0.367)	кВт	0.38	0.19	0.15
Нагрев охлаждающей воды (E=3 ГэВ, 1 Гц, k=0.367)	Град.	8.80	4.30	3.40
Индуктивность магнита	мГн	16.00		
Общий вес магнита	кг	255		

Основные параметры секступольных магнитов

На бустере используется 16 секступолей двух типов. Каждый секступоль имеет отдельное питание. Общий вид – на рисунке 4.3.9, основные параметры – таблица 4.3.6.

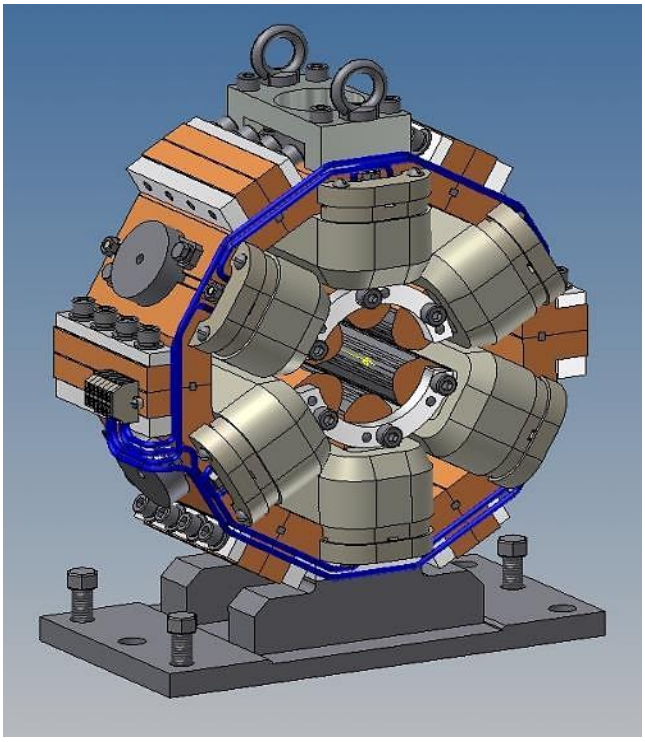

Рисунок 4.3.9. Общий вид секступольного магнита

Таблица 4.3.6. Основные параметры секступолей

Тип секступоля		SF	SD
Количество секступолей		8	8
Максимальный K2	$м^{-3}$	20	-20
Эффективная длина ярма магнита	M	0.12	0.12
Диаметр зазора	Мм	40	40
Частота	Гц	2	2
Пиковый ток Imax	A	6	6
Сопротивление секступоля	Ом	1	1
Индуктивность	мГн	104	104
Рассеяние тепла магнитом	Вт	36	36
Область хорошего поля	Мм	Ø30	Ø30
Неоднородность поля на диаметре Ø 30 мм		$<10^{-2}$	$<10^{-2}$
Нагрев охл. воды	град.	<5º	<5º
Общий вес 1 секступоля без подставки	Кг	40	40

Основные параметры корректирующих магнитов

На бустере используется 3 типа корректоров. Корректоры типа CY используются для корректировки пуска по вертикали. Корректоры типа CX и CX1 для корректировки по горизонтали. Корректор типа CX1 имеет больший зазор и используется на участках впуска и выпуска пучка.

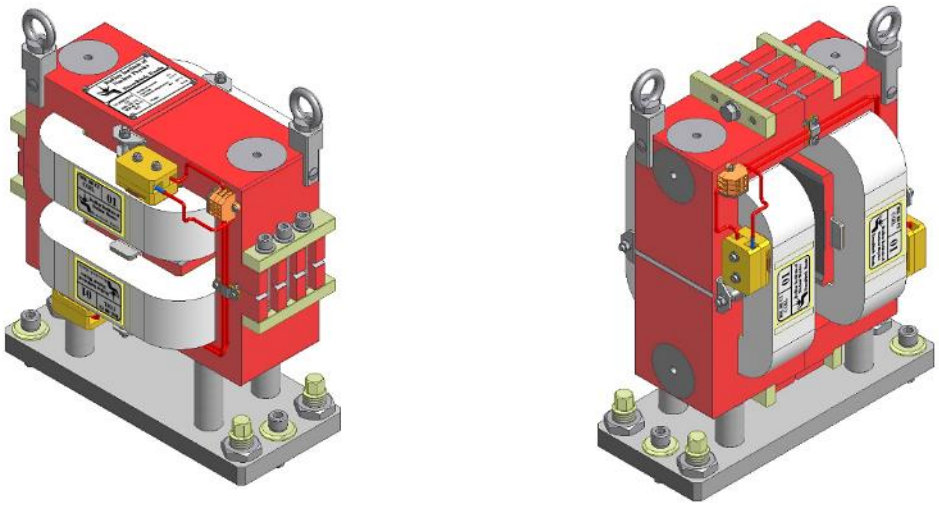

Рисунок 4.3.10. Общий вид корректирующих магнитов

Таблица 4.3.7. Основные параметры корректирующих магнитов

Корректор		CX	CX1	CY
Количество магнитов		12	8	16
Зазор	мм	28	45	45
Амплитуда магнитного поля	Т	0.13	0.08	0.08
Интеграл магнитного поля	Т*м	1.6	1.1	1.1
Угол поворота для 3 Гэв	мрад	1.7	1.1	1.1
Эффективная магнитная длина	м	0.12	0.13	0.13
Область хорошего магнитного поля	мм	± 20		
Неоднородность в пределах области хорошего поля		$5 \cdot 10^{-3}$		
Общая длина магнита вдоль орбиты	мм	< 200		
Длина ярма вдоль орбиты	мм	90		
Пиковый ток I_{max}	А	5		

Активное сопротивление магнита	Ом	1.65		
Индуктивность магнита	Гн	0.4	0.25	0.25
Перепад напряжения активного	В	8.5	8.5	8.5
Перепад напряжения реактивного	В	12.5	8	8
Среднее потребление мощности магнитом при пиковом токе 5 А	Вт	10		
Перепад температур при пиковом токе 5 А	°С	8		
Общий вес магнита	кг	35.5	36.5	36.5

Источники питания магнитов бустера

Для магнитной системы бустера требуется 59 источников питания с пиковой мощностью потребления около 1.3 МВА. Время ускорения 0.26 с, при частоте повторения 1 Гц. Токи должны быть синхронно настраиваться в процессе ускорения пучка. Требования на синхронизацию во время снижения поля отсутствуют. Ниже в таблице 4.3.8 приводится список источников питания для бустера.

Таблица 4.3.8. Список источников питания для бустера

Источники питания для магнитов	Кол-во	Ток (макс.), А	Резистивное напряжение, В	Пиковое напряжение, В	Пиковая выходная мощность, КВА, (полная)
BR-BF	1	900	82.0	200	180
BR-BD	2	750	220	700	1050
BR-QF	1	167	48.8	160	25.6
BR-QD	1	118	34.4	160	25.6
BR-QG	1	105	31.2	160	25.6
BR-SXV	8	6	6.7	60	2.88
BR-SXH	8	6	6.7	60	2.88
BR-CX	20	6	10	60	7.2
BR-CY	16	6	10	60	5.76
DC Септум	1	500	8	12	6.0
Итого	59	Полная мощность:			1 331.52

Для корректоров и секступолей требуются маломощные источники питания с током меньше 10 А, такие же как используются для корректоров на основном кольце. Каждый корректор и секступоль имеет отдельный источник питания.

Что касается источников питания для диполей и квадруполей, то в отличие от электромагнитов основного кольца, работающих с постоянными или медленно изменяющимися магнитными полями, электромагниты бустерного синхротрона работают в циклическом режиме с частотой цикла до 2 Гц.

4.4. Система впуска-выпуска бустерного синхротрона

Инжекция в бустер

Инжекция в бустер осуществляется на энергии 200 МэВ. Система инжекции в бустер (рис.4.4.1) состоит из септум-магнита и 4 кикеров.

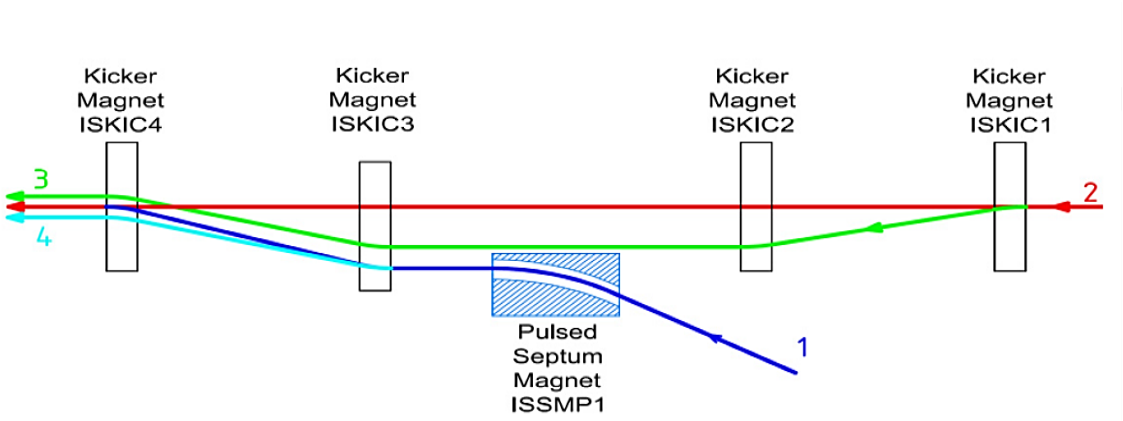

Рисунок 4.4.1. Система впуска в бустер (1- инжектируемый пучок,
2- равновесная орбита циркулирующего пучка,
3- траектория пучка при инжекции в него).

Инжекция в бустер может быть сделана в двух режимах:

Однооборотная инжекция: Инжекция одного сгустка с зарядом 0.5 нКл или последовательности из 1÷55 сгустков через 5.6 нс (предполагается, что частота ВЧ бустера 178.5 МГц) с полным зарядом 15 нКл.

Инжекция в режиме накопления: В этом случае через 100 мс добавляется новая порция, которая удваивает заряд в каждом сгустке.

Для реализации однооборотной инжекции и накопления в инжекционном промежутке бустера расположены 4 быстрых кикера с ферритовыми сердечниками с временем подъёма поля на фронте 150 нс и временем спада поля 300 нс (периметр бустера составляет 159 м и период обращения – 0.53 мкс), а также импульсный септум магнит с длительностью импульса поля 100 мкс.

Септум магнит ISSMP1 расположен в центре длинной центральной секции и пластины септума сдвинуты на 20.5 мм от равновесной орбиты. Нож септума имеет толщину 4.6 мм. Септум ISSMP1 запускает инжектируемый пучок под нулевым углом и со смещением на 29.5 мм от равновесной орбиты.

При однооборотной инжекции кикеры ISKIC3 и ISKIC4 переводят инжектируемый пучок (синяя линия 1 на рис.4.4.1) на равновесную орбиту бустера

(красная линия 2 на рис.4.4.1) и выключаются до того, как пучок сделает первый оборот. Кикеры ISKIC1 и ISKIC2 при однооборотной инжекции выключены.

В режиме накопления первый пучок инжектируется так же, как и при однооборотной инжекции и вращается в бустере по равновесной орбите. Чуть позже, через 100 мс, когда в бустер влетает второй пучок, кикеры ISKIC1 и ISKIC2 переводят пучок (зелёная линия 3 на рис.4.4.1) рядом с ножом импульсного септума. Кикеры ISKIC3 и ISKIC4 переводят оба пучка поближе к равновесной орбите бустера.

Выпуск из бустерного синхротрона

Выпуск бустера состоит из четырёх медленных бампов, двух септумов и кикерной сборки (рис.4.4.2).

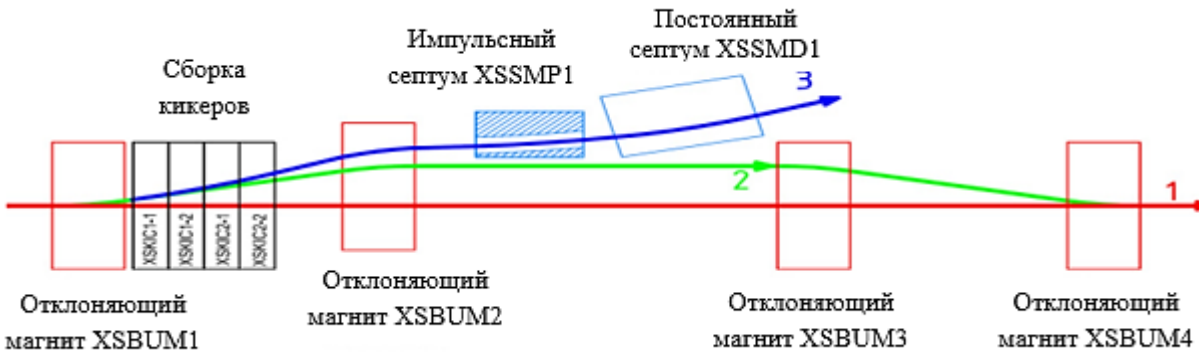

Рисунок 4.4.2. Система выпуска из бустера (1- орбита циркулирующего пучка, 2- орбита перед выпуском, 3- траектория выпущенного пучка)

Процесс выпуска пучка происходит следующим образом. По завершению цикла ускорения до энергии E = 3 ГэВ, следует 10 мкс пауза для того, чтобы пучок пришёл в равновесное состояние и завершились переходные процессы в железе магнитов. За 750 мкс до выпуска пучка срабатывают 4 импульсных бамповых магнита (XSBUM1 – XSBUM4) для локального сдвига орбиты на 17 мм. За сотни оборотов в бустере пучок подводится к ножу септум-магнита так, что расстояние между пучком и ножом импульсного септума XSSMP1 составляет 3.5 mm (зеленая линия 2 на рис.4.4.2). После этого кикерная сборка ударом подаёт пучок в апертуру септумного магнита. После поворота в септуме XSSMP1 на 48 мрад пучок подлетает ко входу в DC септум XSSMD1 (синяя линия 3 на рис.4.4.2). В этом месте расстояние между выпускаемым пучком и осью бустера составляет 8.0 см. После дополнительного поворота на 106 мрад в DC септуме пучок проходит XSBUM3 возле бамп-магнита. Расстояние между пучком и осью бустера в этом месте составляет 20 см.

Инжекция в синхротрон

Схема инжекции в синхротрон совпадает со схемой инжекции в бустер. Инжектируемый пучок вводится в апертуру бустера при помощи септум-магнита, затем кикерами 3 и 4 пучок попадает на равновесную орбиту. При инжекции следующих пучков, циркулирующий пучок кикерам 2 и 3 подводится как можно ближе к ножу септум-магнита, после чего кикерами накопленный и инжектируемый пучки выводятся на равновесную орбиту.

Кикер-магниты

В инжекционном промежутке бустера находятся 4 одинаковых кикерных магнита и одна кикерная сборка в экстракционном промежутке бустера. Эта сборка состоит из 4-х кикеров, идентичных инжекционному промежутку бустера. Таким образом, бустер содержит 8 идентичных кикерных магнитов. Основные параметры – таблица 4.4.1, общий вид – рис.4.4.3.

Таблица 4.4.1. Основные параметры ферритовых кикеров

Параметры	Размерность	Для инжекции	Для экстракции
Кол-во магнитов		4	4
Номинальная энергия пучка	МэВ	200	3 000
Угол поворота	мрад	16.5	6.2
Магнитное поле	Т	0.055	0.077
Максимальное пиковое напряжение	кВ	20.0	24.0
Пиковый ток в кикерах	А	1 700	2 400
Индуктивность	мГн	0.65	
Эффективная длина	мм	207	
Зазор между полюсами	мм	82	
Магнитный зазор	мм	38	
Форма импульса		170 нс подъём, 320 нс полка, 190 нс спад	220 нс подъём, 330 нс спад
Качество поля		$\pm 5 \cdot 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$
Магнитный материал		Ферритовый сердечник CMD5005	

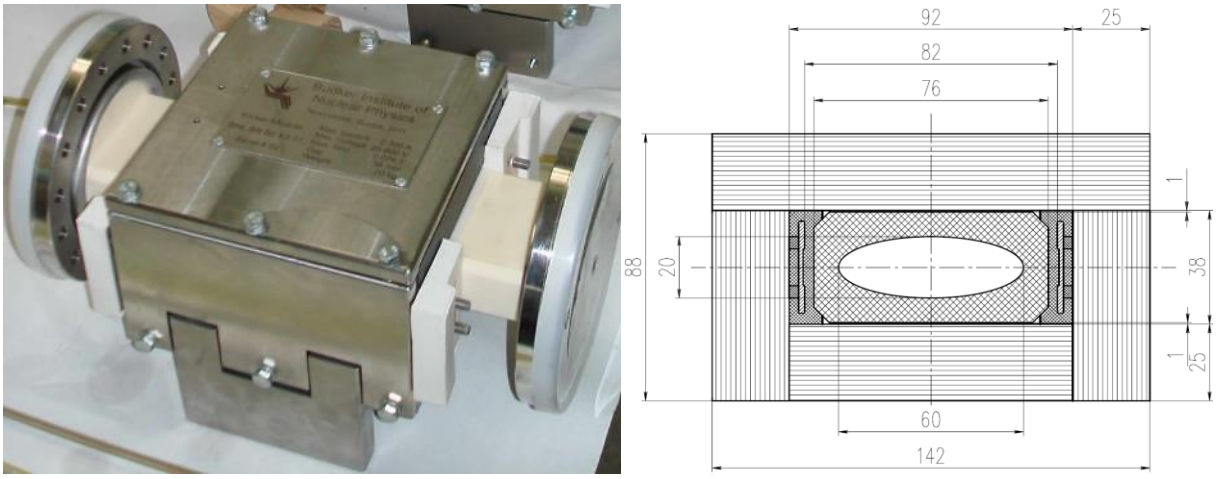

Рисунок 4.4.3. Кикерный магнит с керамической вакуумной камерой

Источники питания для кикер-магнитов

Источники питания кикеров используются для питания инжекционных и экстракционных кикерных магнитов бустера. Источники питания кикеров представляют собой импульсные источники тока, которые питаются напряжением 110 В и частотой 60 Гц и управляются PSC/PSI системой.

Каждый инжекционный кикер питается от отдельного источника питания (таблица 4.4.2). Каждый из двух источников питания экстракционных кикеров питает два кикерных магнита кикерной сборки. Всего имеем 6 источников питания кикеров:

- два источника питания для экстракции;
- два инжекционных источника №1 и №2;
- два инжекционных источника №3 и №4.

Таблица 4.4.2. Параметрами источников питания кикеров

	Экстракционные источники питания	Инжекционные источники питания	
	PS # 1,2	PS №№ 1,2	PS №№ 3,4
Амплитуда выходного тока/ Амплитуда интегрального магнитного поля на оси кикера	4350 А 720 Гс	1300 А 215 Гс	3090А/ 510Гс – первый импульс 1940А/ 320 Гс – второй импульс
Длительность фронта выходного тока (0.4-99.7% - инжекция 0.2-99.9% - экстракция)	< 220 нс	< 220 нс	< 220 нс
Длительность полки выходного тока	> 310 нс	> 310 нс	> 310 нс

Время спада выходного тока (99.7-0.4% - инжекция 99.9-0.2% - экстракция)	-	< 220 нс	< 220 нс
Пульсации верхушки импульса (включая повторяемость от импульса к импульсу)	± 0.2 %	± 0.5 %	± 0.5 %
Пульсации после импульса	-	± 0.5 %	± 0.5 %
Джиттер времени задержки	< 5 нс	< 5 нс	< 5 нс

Каждый источник питания кикерных магнитов (рис.4.4.4) состоит из:

- KPU – Kicker Pulser Unit расположенный под кикерным магнитом в туннеле бустера;
- PSU – Power Supply Unit. Этот блок содержит высоковольтный зарядовый источник питания и расположен вне бустерного тоннеля.

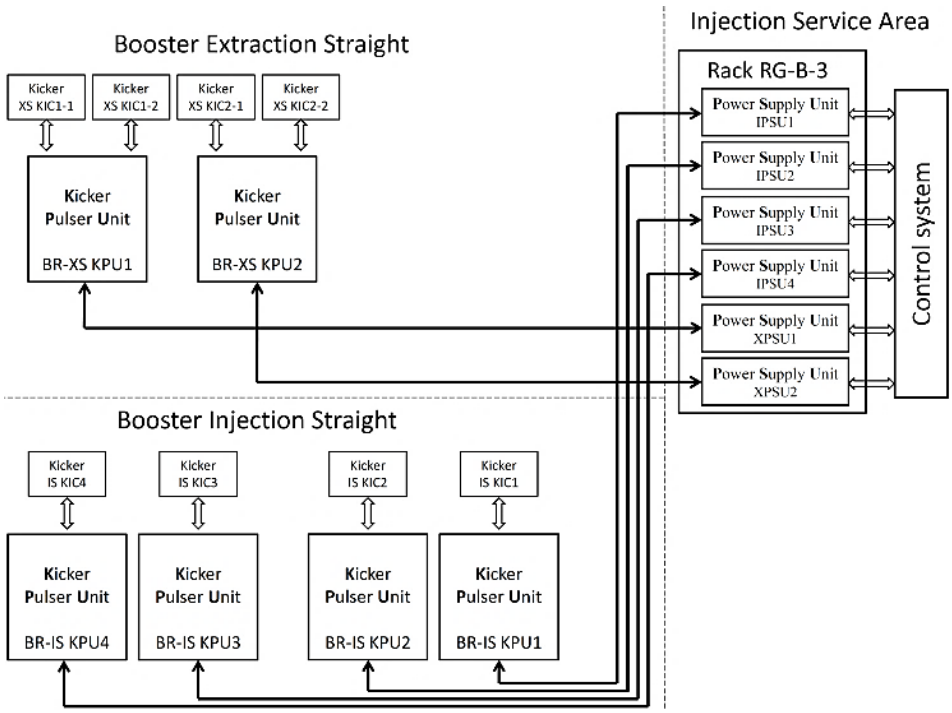

Рисунок 4.4.4. Блок диаграмма источников питания кикеров

Септумные магниты

Экстракционный септум

Экстракционный суптум показан на рис.4.4.5 и рис.4.4.6. Вертикальная апертура септумного магнита 16 мм. Тонкостенная (0.3 мм) вакуумная камера из нержавеющей стали имеет диаметр 15 мм.

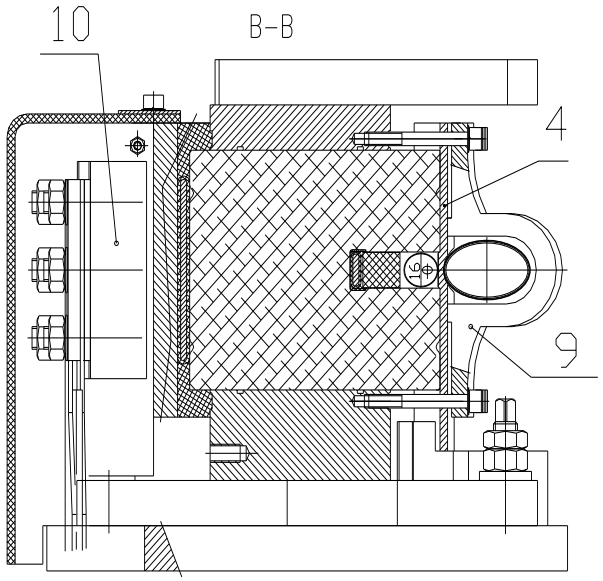

Рисунок 4.4.5. Разрез экстракционного септумного магнита
(4 – медный экран, 9 - защёлкивающаяся планка, 10 – токовый фидер)

При фронте импульсного поля амплитудой 8 кГс защёлкивающаяся планка гасит флуктуациии поля в тонкостенном медном экране.

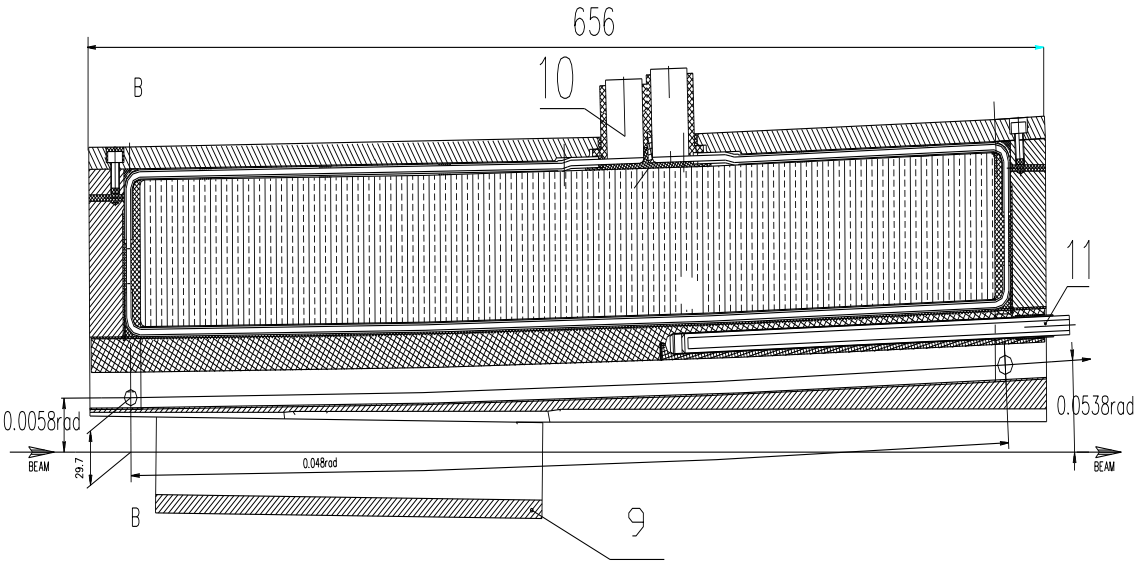

Рисунок 4.4.6. Вид сверху экстракционного септумного магнита в разрезе (9 – защёлкивающаяся планка, 10 – токовый фидер, 11 – место для размещения измерительных катушек)

Инжекционный септум

Инжекционный септум показан на рис.4.4.7 и рис.4.4.8. Вертикальная апертура инжекционного септумного магнита составляет 30 мм. Тонкостенная (0.3 мм) вакуумная камера из нержавеющей стали имеет диаметр 28 мм.

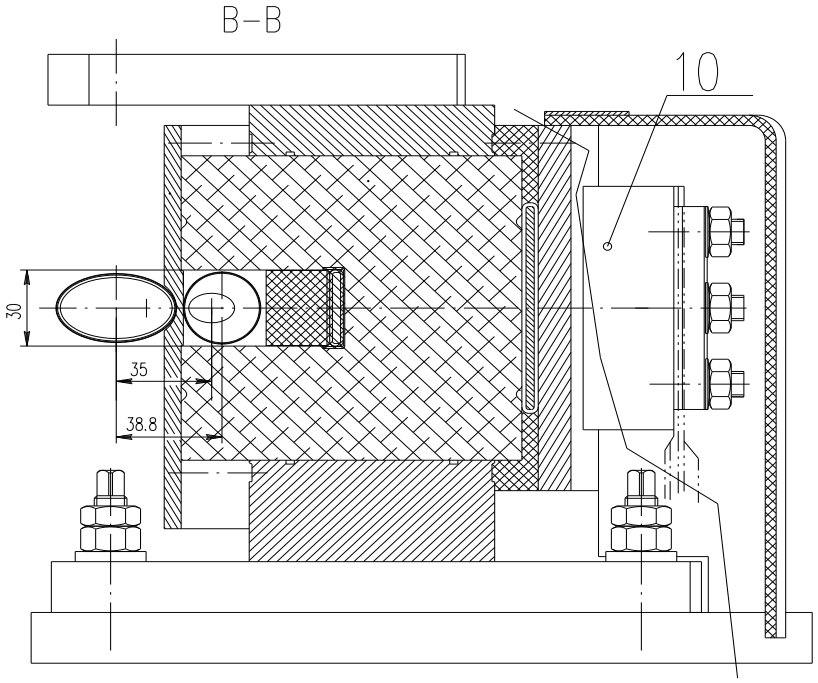

Рисунок 4.4.7. Разрез инжекционного септумного магнита

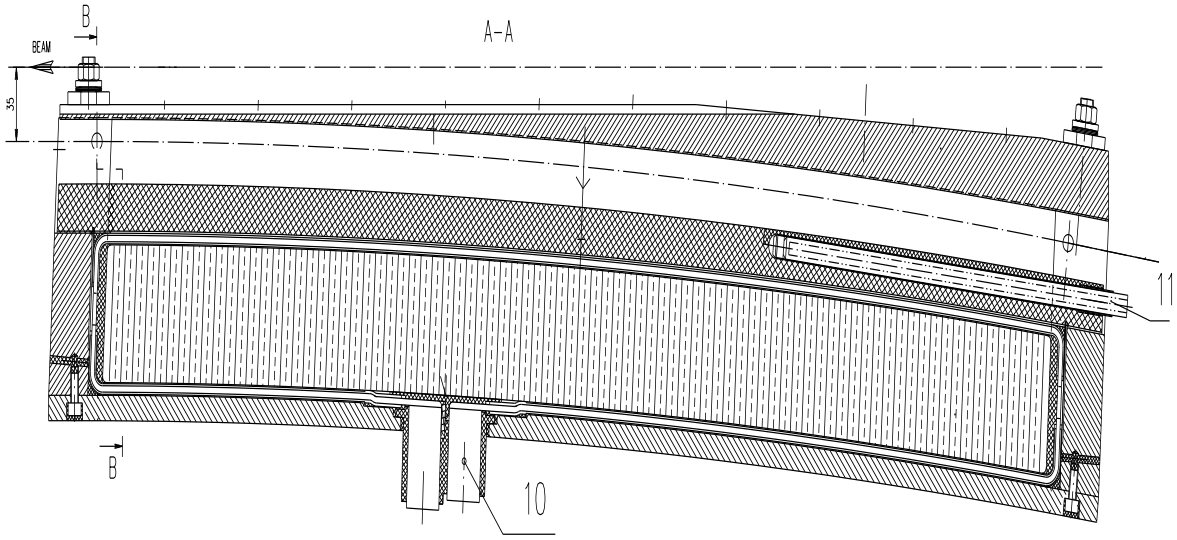

Рисунок 4.4.8. Вид сверху инжекционного септумного магнита
(10 – токовый фидер, 11 – место для размещения измерительных катушек)

Параметры инжекционного и экстракционного септумов приведены в таблице 4.4.3.

Таблица 4.4.3. Основные параметры септумных магнитов

Тип магнита		SP1SI	SP1SE
Количество		1	1
Энергия	МэВ	200	3000
Угол сдвига	мрад	125	48
Длина ярма	м	0.735	0.586
Эффективная длина	м	0.75	0.6
Общая длина	м	0.8	0.656
Магнитное поле	Т	0.111	0.8
Радиус поворота	м	6.0	12.5
Апертура (гор×верт)	$мм^2$	52×30	40×16
Толщина ножа	мм	4.2	4.2
Относительная однородность поля в зазоре (горизонтальный × вертикальный)	$мм^2$	±0.001 26×16	±0.0005 15×10
Количество ампер-витков		2800	10220.0
Количество витков		1	1
Размер медной шинки	$мм^2$	3×28	3×14
Площадь сечения шинки	$мм^2$	84	42
Ток	А	2800	10220.0
Сопротивление (при 30°С)	мОм	0.7	1.0
Индуктивность	мГн	1.55	2.1
Длина импульса (1/2 синус)	мс	100	100
Максимальное напряжение	В	140	680
Рассеяние тепла(2 Hz)	Вт	2	31
Стабильность поля	%	0.05	0.02
Общий вес магнита	кг	170	150

Бамповые магниты

Основные параметры бамповых магнитов – таблица 4.4.4.

Таблица 4.4.4. Основные параметры бамповых магнитов

Количество магнитов		4
Максимальная энергия пучка	ГэВ	3
Зазор	мм	33
Амплитуда магнитного поля	Т	0.45
Интеграл магнитного поля	Т*м	0.075
Угол поворота	мрад	7.5
Эффективная длина магнита	м	0.17
Область хорошего поля	мм	± 20
Неоднородность в области хорошего поля		1×10^{-3}
Общая длина магнита вдоль орбиты	мм	< 200
Длина ярма вдоль орбиты	мм	140
Толщина лам. пластин	мм	0.5
Количество катушек		2
Количество витков на катушку		4
Длина импульса (1 синусоида)	с	3×10^{-3}
Пиковый ток	А	1500
Активное сопротивление магнита	Ом	0.003
Индуктивность магнита	Гн	62×10^{-6}
Падение напряжение активное	В	4.5
Падение напряжения реактивное	В	200
Среднее потребление мощности на магнит	Вт	10
Общий вес магнита	кг	39

Источники питания для септумных и бамповых магнитов

Питающая секция всех трёх источников устроена одинаково – это осциллирующий разряд конденсаторной батареи через индуктивность магнита посредством высокоточного ключа. Блок-диаграмма питающей секции показана на рисунке 4.4.9.

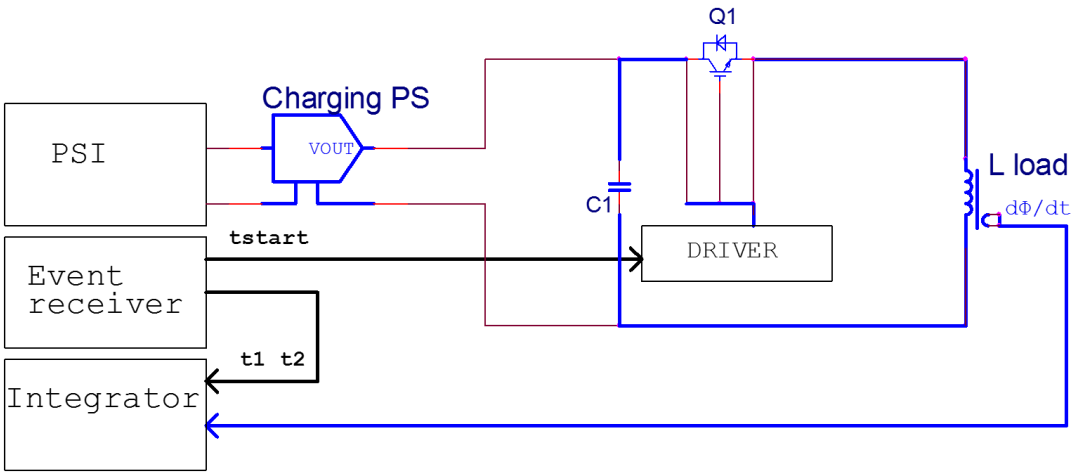

Рисунок 4.4.9. Блок-диаграмма питающей секции источника

Параметры источников питания бампов и септумов – таблица 4.4.5.

Таблица 4.4.5. Параметры источников питания бампов и септумов

Параметр	Единица измерения	Бамп-магнит	Выпускной септум	Впускной септум
Ток	A	1620	10220	2800
Напряжение	B	900	662	145
Длительность(*)	мкс	1500	100(***)	100
Индуктивность	мкГн	248(**)	2.06	1.6
Энергия	Дж	325	108	6.5
Ёмкость	мкФ	900	600	600
Стабильность	ppm	± 500	± 200	± 500
Интервал зарядки	с	0.5	0.5	0.1

(*) «Длительность» означает ½ периода осцилляции тока.
(**) Показана индуктивность серии из 4-х бамп-магнитов при последовательном соединении.
(***) После магнитных измерений возможно увеличение длительности путём увеличения ёмкости конденсаторной батареи и пропорционального уменьшения напряжения на конденсаторной батарее.

ВЧ система

В качестве базового принят вариант ВЧ системы, работающей на частоте 178.5 МГц, что соответствует 95-ой гармонике частоты обращения (при периметре

кольца 159 м). В таблице 4.4.6 приведены основные параметры пучка и ВЧ системы бустера ЦКП «СКИФ» для периметра.

Таблица 4.4.6. Основные параметры пучка и высокочастотной системы бустера

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Максимальная энергия электронов	$E_{\max}$	3	ГэВ
Номинальный ток пучка	I_b	20	мА
Полные максимальные потери на СИ	$U_{\max}$	685.8	кэВ/об.
Коэффициент уплотнения орбит	α	$8.82 \cdot 10^{-3}$	
Частота ВЧ системы	f_{rf}	178.5	МГц
Кратность ВЧ	H	95	
Номинальное ускоряющее ВЧ напряжение	V_{rf}	1	МВ
Синхротронная частота (для $V_{rf\ max}$)	f_S	10.9	кГц
Контроль высших мод	Отстройка тюнерами		
Число резонаторов	N_{cav}	2	
Характеристическое сопротивление 1-го резонатора *)	$R/Q \cdot T^2$	107.2	Ом
Добротность резонатора (70% расчетной)	Q_0	40 000	
Шунтовое сопротивление 1-го резонатора *)	$R_{Sh} \cdot T^2$	4.3	МОм
Коэффициент связи	β	1.24	
Мощность потерь в стенках 1-го резонатора при V_{rf1} = 500 кВ	P_{Cu1}	29.15	кВт
ВЧ мощность на 1 резонатор (включая потери на СИ)	P_1	36.01	кВт
ВЧ мощность усилителя на 1 резонатор (включая потери в фидере 10%)	P_{g1}	39.61	кВт
Число усилителей мощности (УМ)	N_g	2	
Мощность, потребляемая ВЧ системой (при КПД УМ 50%) «от сети»	P_{wall}	0.08	МВт

*) – характеристическое и шунтовое сопротивления резонаторов приведены с учетом коэффициента пролета и «с двойкой в знаменателе» (RSh·T2 = Vrf12 / 2PCu1, где Vrf1 – амплитуда ускоряющего напряжения на 1-ом резонаторе).

Резонаторы

Резонаторы бустера – нормально проводящие, аналогичные резонатору Duke-1 лаборатории DFELL (первый резонатор, поставленный ИЯФ СО РАН в Duke Free Electron Laser Laboratory).

Резонатор представляет собой «типовой» биметаллический резонатор ИЯФ СО РАН из серии резонаторов для источников СИ и лазеров на свободных электронах. На торцевых стенках резонатора изнутри сделаны выступы, размеры которых рассчитаны так, чтобы частота основной моды была равна рабочей (рис.4.4.10). При этом несколько снизилось характеристическое сопротивление резонатора, но увеличился коэффициент пролета (до 0.917). Резонатор Duke-1 был испытан при полном напряжении на зазоре 1000 МВ в непрерывном режиме.

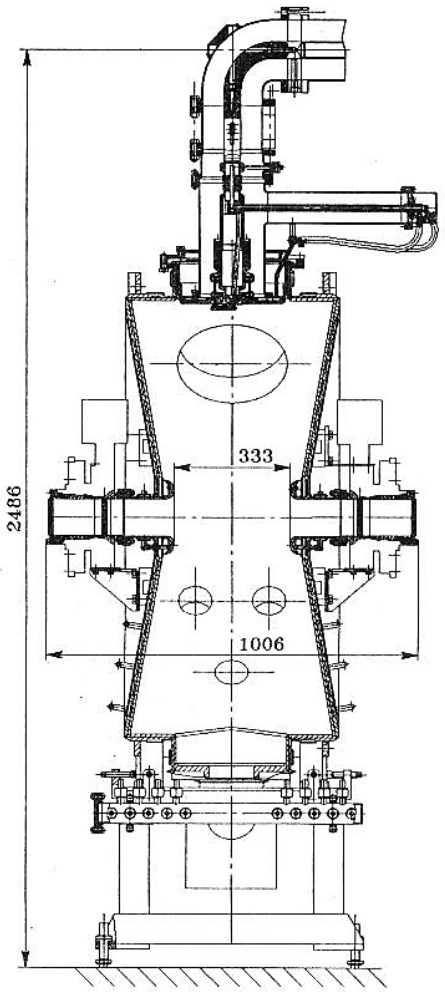

Рисунок 4.4.10. Схематический чертеж резонатора Duke-1

Резонатор не имеет нагрузки высших мод. Резонатор имеет 4 тюнера – 2 для перестройки рабочей частоты и 2 для перестройки частот высших мод. Два последних используются для отстройки высших мод резонатора от гармоник частоты обращения

для обеспечения устойчивого продольного движения частиц в ускорителе. При работе резонатора в составе основного кольца DFELL удавалось получать в кольце ток электронов ~100 мА, оптимизируя положения этих тюнеров. Номинальный ток в бустере ЦКП «СКИФ» составляет 20 мА, поэтому резонаторы, аналогичные Duke-1, могут быть использованы для бустера ЦКП «СКИФ». Для бустера требуется 2 резонатора, которые могут быть конструктивно объединены в пару (рис.4.4.11).

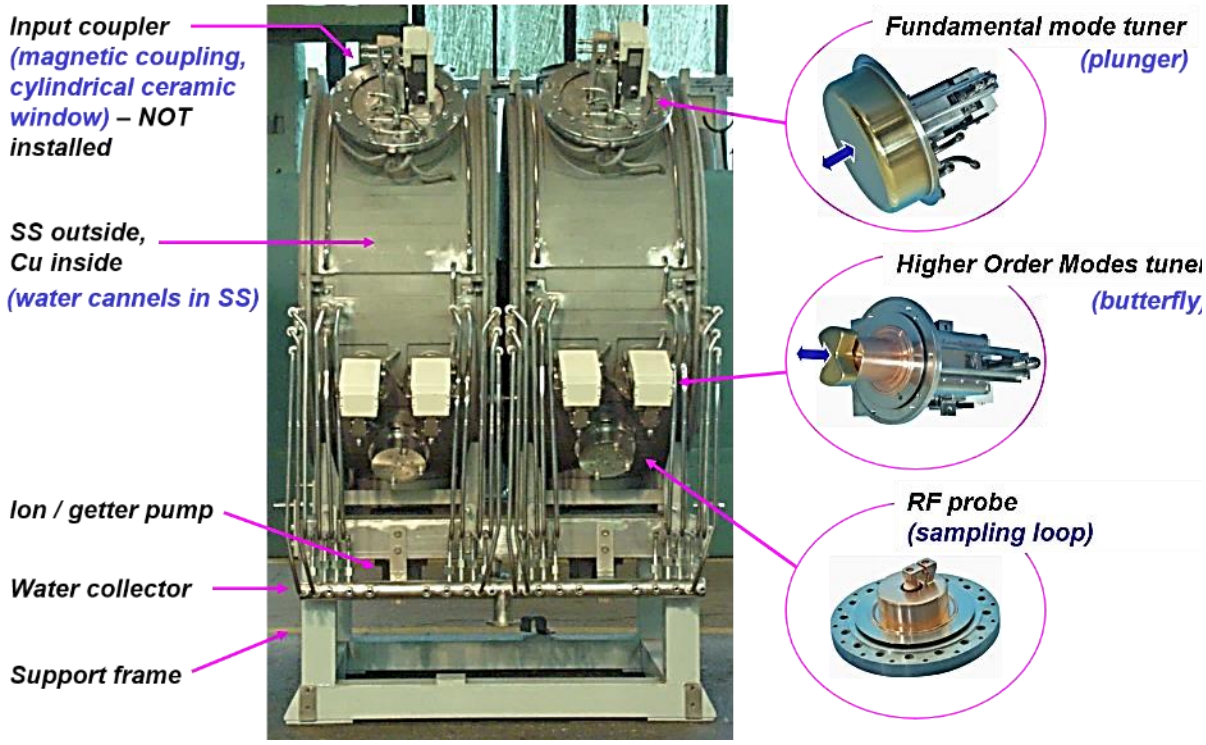

Рисунок 4.4.11. Фотография пары резонаторов

Усилители мощности

Каждый резонатор питается от независимого УМ. УМ может быть построен по схеме: твердотельный (транзисторный) предварительный усилительный каскад – одномодульный выходной каскад на тетроде ГУ-101А. Максимальная выходная мощность УМ с одномодульным выходным каскадом на ГУ-101А – не менее 100 кВт. Для одного резонатора бустера требуется ~40кВт. Таким образом, тетроды будут сильно недоиспользованы по мощности, что увеличит срок их службы. Возможно также использовать и полностью твердотельный УМ.

Вакуумная система

Периметр вакуумной камеры бустера составляет 159 метров. Для изоляции отдельных участков вакуумной камеры бустера на кольце установлены 8 пневматических шиберов с металлическим уплотнением (время срабатывания ~2–3 с).

Бустер состоит из 4 поворотных секторов (примерно 31 метр каждый) и 4 прямолинейных промежутков (по 8 метров каждый). Все вакуумные камеры изготавливаются из нержавеющей стали марки 316 L и с фланцевыми соединениями типа Conflat. Апертура вакуумной камеры в поворотных секциях есть эллипс 41×24 мм (молекулярная проводимость камеры порядка 3.2 л·м/с), а в прямолинейном промежутке апертура большинства камер – эллипс 62 × 22 мм (молекулярная проводимость камеры порядка 4 л·м/с). После изготовления все вакуумные камеры подвергаются специальной химической обработке для уменьшения коэффициента газовыделения.

Для соблюдения гладкости вакуумной камеры и уменьшения потерь электронного пучка на излучение изготовляются специальные переходы с эллипса 41 × 23 мм на круг диаметром 46 мм, места под откачку делаются из цельной трубы с выфрезированными полостями для откачки, а также некоторые сильфонные узлы в прямолинейных промежутках снабжены ВЧ-контактами, повторяющими форму вакуумной камеры.

Давление остаточного газа после накопления интеграла тока порядка 1 А · ч должно быть не хуже 10^{-7} торр. Обеспечение вакуума осуществляется при помощи магниторазрядных насосов (всего насосов 71 шт.) со скоростью откачки 45 л/с, расположенных в среднем на расстоянии 2.3 м друг от друга. Для измерения вакуума устанавливаются магниторазрядные датчики давления с холодным катодом по 2 шт. в каждой секции, а для измерения форвакуума планируется использовать датчики давления. Определение спектра остаточного газа и поиск микротечей осуществляется при помощи масс-спектрометров. На рис.4.4.12 представлено расположение основных компонент вакуумной системы бустера.

Достаточно сильное синхротронное излучение приводит к дополнительной фотостимулированной десорбции молекул остаточных газов со стенок вакуумной камеры и может привести к значительным механическим напряжениям в вакуумной камере из-за неравномерного нагрева.

Несмотря на импульсный режим работы бустера (скважность по интенсивности СИ составляет 1/7 при частоте повторения 2 Гц), десорбция газов под действием фотонов на стенки вакуумной камеры превосходить термическую десорбцию. На рис.4.4.13 показан профиль распределенного давления для одного периода.

Из-за относительно малой мощности СИ (максимальная мощность равняется 44 Вт/м в поворотных BD магнитах) в специальных приемниках излучения нет необходимости. Однако такое излучение может привести к появлению механических напряжений в вакуумной камере.

Как было найдено, на стенку вакуумной камеры падает синхротронное излучение мощностью порядка 44 Вт/м, что приводит к неравномерному нагреву камеры в местах прямого воздействия СИ на 60 градусов Цельсия (расчетная $\Delta T = 62°C$).

В таблице 4.5.6.1 приведены основные элементы вакуумной системы.

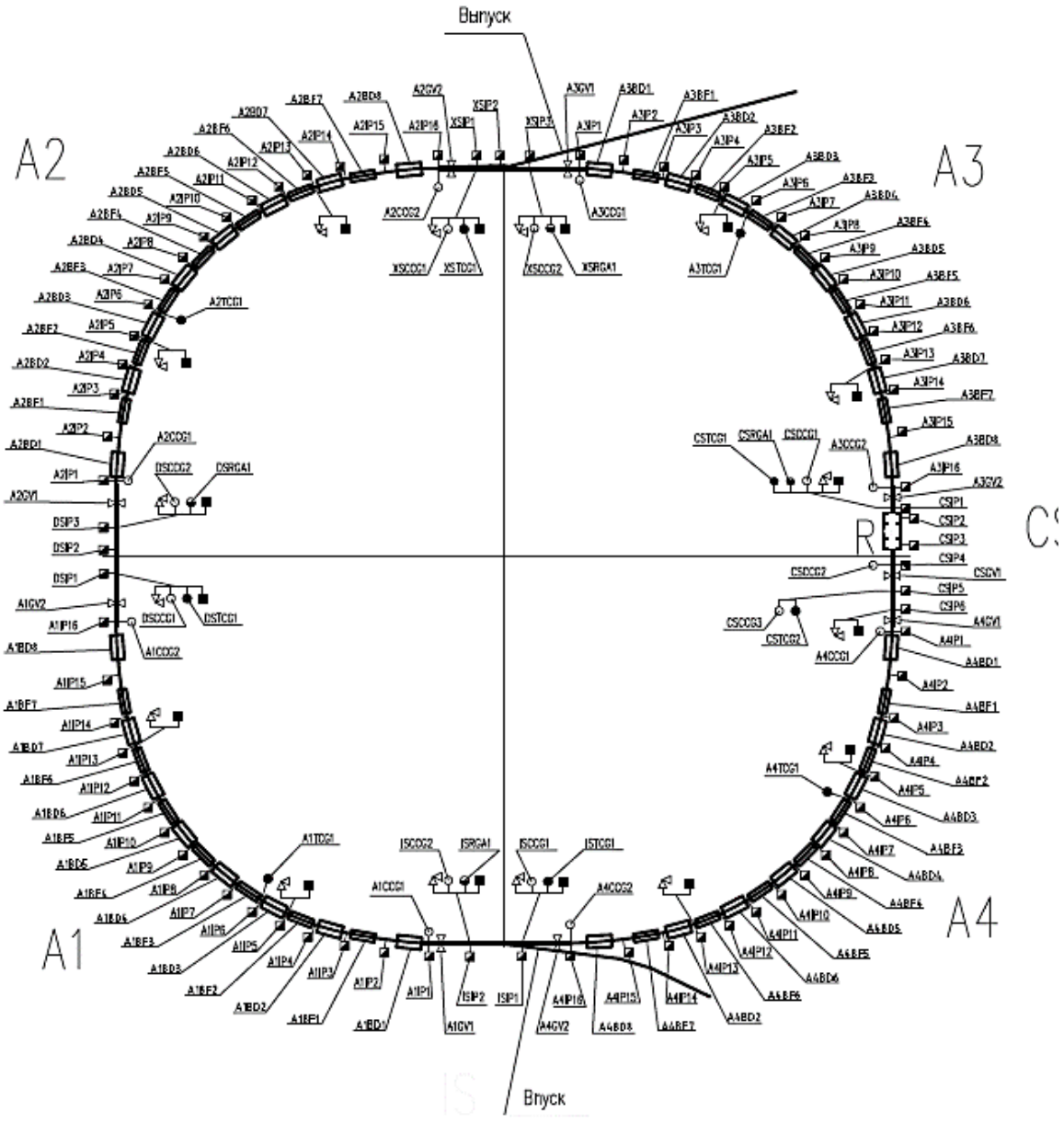

Рисунок 4.4.12. Схема вакуумной системы бустера

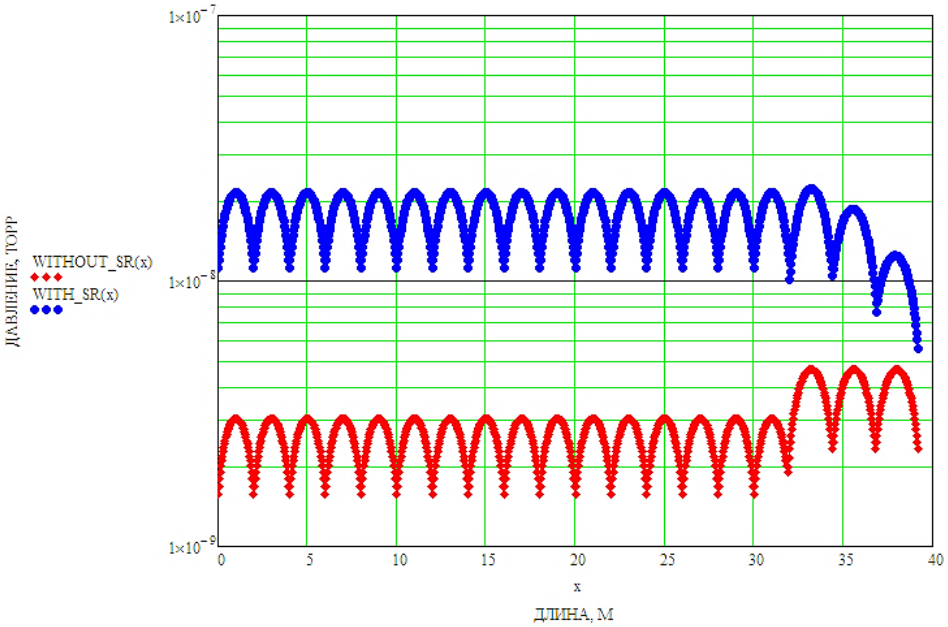

Рисунок 4.4.13. Профиль распределения давления для одного периода бустера

Таблица 4.4.7. Список компонентов вакуумной системы бустера

Место	IP	TCG	CCG	RGA	GV	RV	IPC	GC
Арка A1	16	1	2	1	2	2	8	1
Промежуток диагностики	2	1	2	-	-	2	1	1
Арка A2	16	1	2	-	2	2	8	1
Промежуток экстракции	3	1	2	-	-	2	2	1
Арка A3	16	1	2	1	2	2	8	1
ВЧ промежуток	-	-	-	-	-	-	-	-
Арка A4	16	1	2	1	2	2	8	1
Промежуток инжекции	2	1	2	-	-	2	1	1
Всего	71	7	14	3	8	14	36	7

где IP- ионный насос, TCG- датчики давления типа Pirani, CCG- магниторазрядные насосы, RGA- анализатор остаточного газа, GV- пневматический шибер с металлическим уплотнением, RV- цельнометаллический прямоугольный клапан, PG- датчик давления для шиберов.

Диагностика пучка

Для успешного запуска и для эффективного управления бустером целый ряд параметров должен измеряться в режиме реального времени. Перечень типичных задач, относящихся к измерению параметров пучка, приведён ниже:

1). Запуск:

- проводка пучка через транспортные линии;
- согласование эмиттанса пучка с акцептансом ускорителя;
- наблюдение и коррекция траектории пучка при совершении первого оборота;
- мониторинг пучка во время инжекции и ВЧ захвата.

2). Текущее управление. На этой стадии необходимы следующие измерения и коррекции пучковых параметров:

- циркулирующий ток и время жизни пучка;
- структура заполнения;
- замкнутая орбита;
- бетатронные и синхротронные частоты;
- хроматизм;
- продольный и поперечный размеры пучка.

3). Оптимизация работы бустера:

- измерение и коррекция функций магнитной структуры;
- настройка нелинейной динамики пучка;
- подавление нестабильностей;
- подавление возмущений пучка, вызванных внешними факторами.

Отдельной важной проблемой является калибровка и работоспособный контроль систем пучковой диагностики, а также изучение самой системы с целью улучшения точности, долговременной стабильности и т.п.

Первый этап запуска бустера связан с проведением первого оборота с помощью флуоресцентных экранов (пучковый флаг) и электростатических датчиков положения пучка (BPMs) разработанных для измерения замкнутой орбиты. Первый флаг используется для регулировки септума и впускных кикеров при впуске пучка в бустер. В результате корректировки магнитов первой арки мы сможем наблюдать пучок на втором. Для нахождения предполагаемого места потери пучка BPMs могут быть использованы в однооборотном режиме. Для замыкания первого оборота эти же процедуры должны быть выполнены для всех остальных арок. Если пучок проходит все BPMs без потерь положение пучка может быть измерено даже при первом обороте.

Следующий шаг – провести бетатронный захват (при выключенных ВЧ резонаторах) пучка с существенно большим током. Обычно это можно сделать путём корректировки замкнутой орбиты, используя BPMs и корректирующие магниты. На этой стадии коррекция орбиты достигается путём создания матрицы откликов. Время жизни пучка в бетатронной моде составляет несколько секунд, что достаточно для измерения бетатронных частот при помощи системы измерения частот и выставки на проектную рабочую точку. Анализ данных BPMs с последовательных оборотов позволяет нам измерить и скорректировать ошибки при инжекции в положении пучка и импульса.

Настройка ускоряющих ВЧ резонаторов и установка соответствующей фазы позволяет выполнить синхротронный захват пучка. На этой стадии выполняется измерение и коррекция хроматизмов, бетатронных функций и дисперсии. Также может быть измерена матрица откликов для коррекции орбиты.

Для оптимизации набора энергии мы повышаем энергию пучка шаг за шагом, путём набора промежуточных значений. Измерение матрицы откликов, равно как и измерение и коррекция частот, замкнутой орбиты, хроматизма и бета-функций, выполняется в каждой промежуточной точке и операционный машинный режим сохраняется для использования в регулярном подъеме.

Схематическое расположение диагностического оборудования в бустере приведено на рис.4.4.14, в таблице 4.4.8 указан перечень диагностического оборудования.

Замкнутая орбита пучка измеряется электростатическими BPMs с возможностью измерений каждого оборота. Вычисляемый ток и время жизни пучка измеряется трансформатором постоянного тока (DCCT). Структура заполнения контролируется при помощи быстрого токового трансформатора (FCT). Видимое синхротронное излучение используется для наблюдения формы пучка. Флуоресцентные экраны используются при запуске и поиске неисправностей. Бетатронные частоты измеряются при помощи двух пар полозковых линий, первая пара используется для возбуждения колебаний, а вторая – для измерения отклика пучка. Всё оборудование и подсистемы радиационно-стойки и способны работать в условиях ускорителя (при наличии ЭМИ, радиации, вибраций и т.п.).

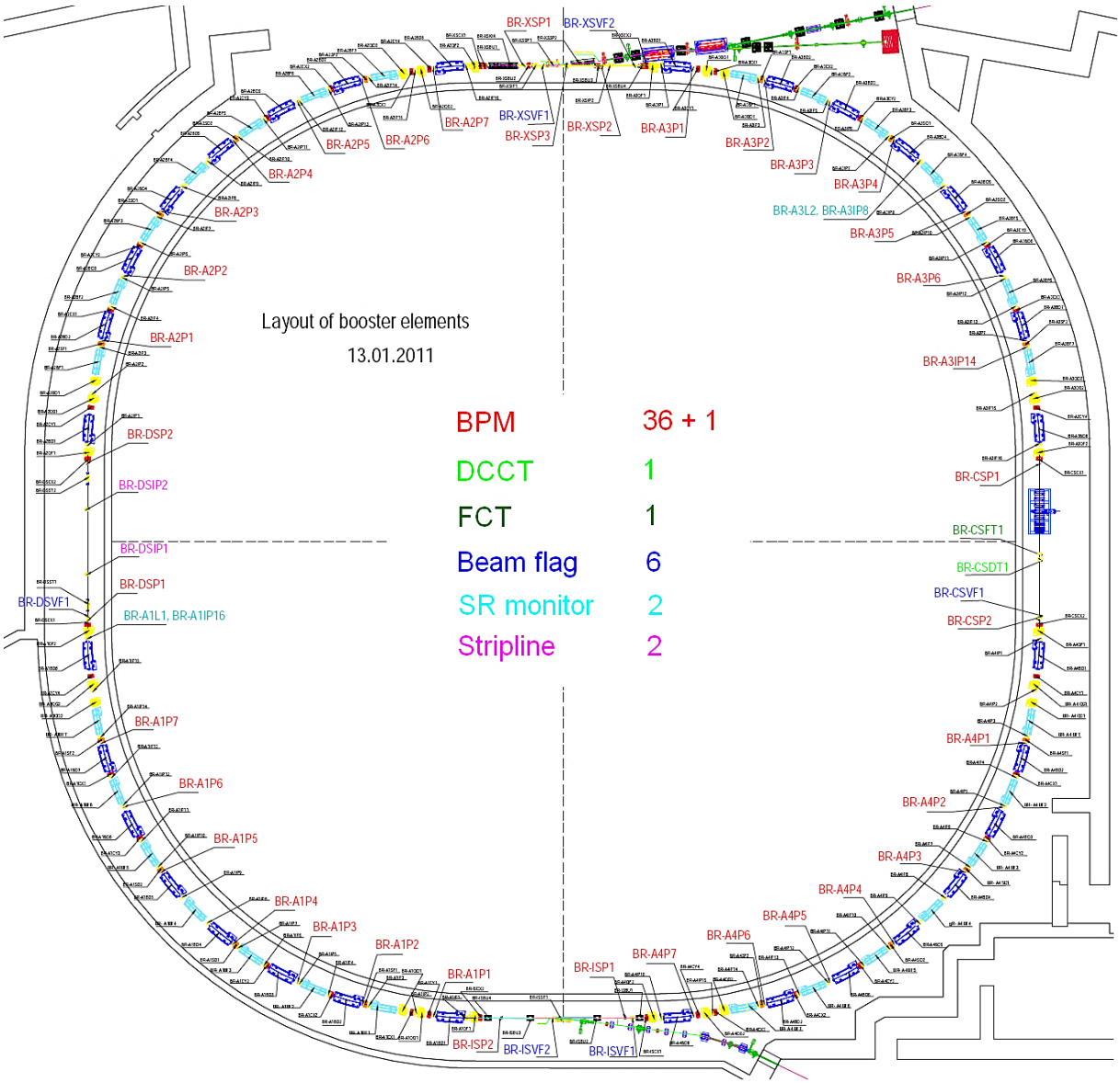

Рисунок 4.4.14. Схема диагностики на бустере

Таблица 4.4.8. Бустерные устройства диагностики пучка

Устройство	Кол-во
BPM – датчики положения пучка	37
DCCT- трансформатором постоянного тока	1
FCT - быстрый токовый трансформатор	1
Флуоресцентные экраны (Beam flags)	6
Монитор СИ (SR monitor)	2
Стриплайн (Stripline) – полозковый линии	2
Система измерения бетатронных частот	1

4.5. Каналы транспортировки

Транспортный канал от линака до бустера

Канал предназначен для транспортировки пучков электронов энергией 200 МэВ от линака до бустера, а также для согласования параметров впускаемого пучка с циркулирующим пучком в бустере (рис.4.5.1).

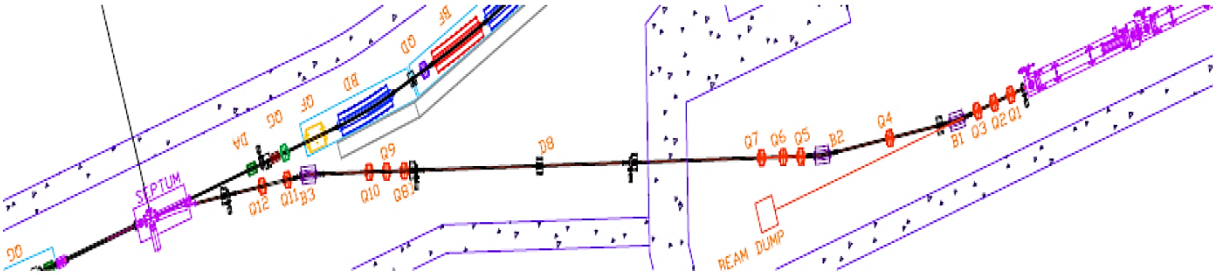

Рисунок 4.5.1. Канал от линака до бустера

Канал состоит из 3-х дипольных магнитов с углом поворота 150 мрад, 12 квадрупольных линз, 2-х горизонтальных и 2-х вертикальных корректоров. В состав диагностического оборудования канала входят: 2 измерителя тока, 6 пикапов (BPM), 6 люминофорных датчика.

Транспортный канал от бустера до синхротрона.

Пучок в бустере ускоряется до 3 ГэВ, после чего система выпуска выводит пучок в канал от бустера до синхротрона. Система выпуска бустера состоит из 4-х медленных кикеров (БАМП-магнитов), импульсного септум-магнита, постоянного септум-магнита и кикера.

Делая искажение орбиты медленными кикерами, ускоренный 3 ГэВ пучок электронов за сотни оборотов подводится к ножу септум-магнита. После чего ударом кикера пучок выбивается из бустера в апертуру септум-магнита.

Канал от бустера до синхротрона предназначен для транспортировки пучков электронов энергией 3 ГэВ и согласования параметров впускаемого и циркулирующего в синхротроне пучков (рис.4.5.2).

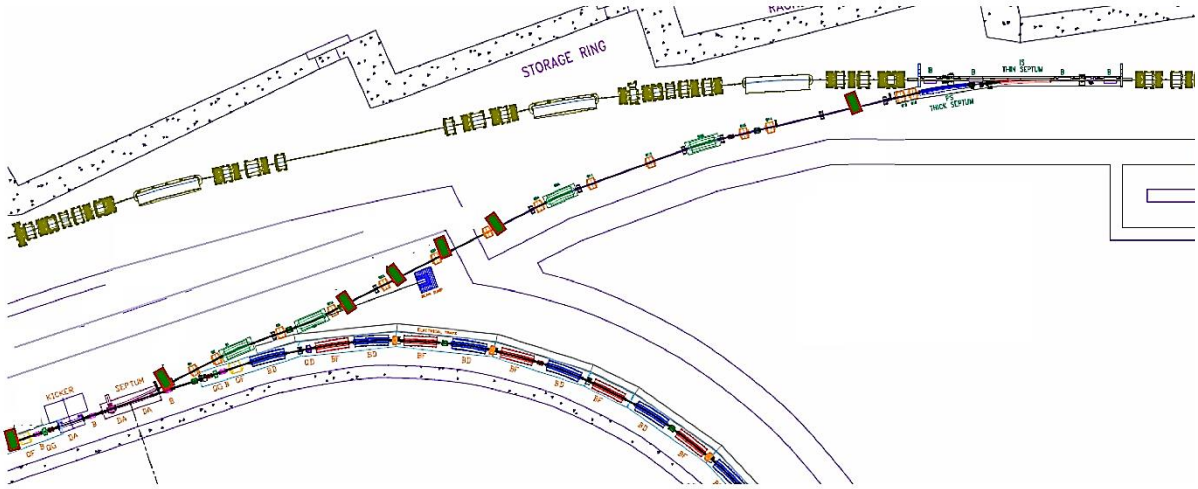

Рисунок 4.5.2. Канал от бустера до основного кольца

Канал состоит из 4 дипольных магнитов с углом поворота 120 мрад, 14 квадрупольных линз, 4 горизонтальных и 4 вертикальных корректоров. Диагностика канала состоит из: 2-х измерителей тока, 7 пикапов (BPM), 7 люминофорных датчиков.

5. Инженерно-строительная инфраструктура ЦКП «СКИФ»

В рамках эскизного проекта получены предварительные результаты:

- определена функциональная концепция комплекса зданий, определены основные параметры зданий, расположение и ориентация зданий на местности;
- определено функциональное назначение инженерно-технологического оборудования, необходимого для обеспечения работы ЦКП «СКИФ», а также для обеспечения нормальных условий для работы персонала и пользователей в помещениях центра;
- оценены объемы основных потребляемых ресурсов (электроэнергия, вода и др.);
- составлена предварительная смета на строительство и приобретение инженерно-технологического оборудования.

Предварительное размещение комплекса зданий и сооружений на отдельной площадке показано на рис.5.1. Площадь территории, занимаемой комплексом зданий и сооружений, около 15 Га.

На въезде расположена парковка на 250 автомашин для персонала и посетителей ЦКП «СКИФ».

Центральную часть территории занимает основное здание комплекса – кольцевое здание, в котором размещается ускорительный комплекс и пользовательские станции. Кольцевое здание имеет 2 «крыла», в которых размещаются «длинные» каналы. Административный и лабораторный корпуса примыкают к основному кольцевому зданию.

В административном корпусе, примыкающем к основному кольцевому зданию, размещается административный персонал ЦКП «СКИФ», организовывающий работу всего центра коллективного пользования. В административном корпусе расположены офисные помещения, конференц-зал, залы заседаний.

В лабораторном корпусе, также примыкающем к основному кольцевому зданию, располагаются лабораторные помещения, чистые комнаты, специальное измерительное, вычислительное и обучающее оборудование.

В глубине территории за кольцевым зданием располагаются вспомогательные здания и сооружения: энергоблок, дистилляторная/компрессорная, площадка для размещения градирен, криогенная станция, центральный тепловой пункт, пожарный резервуар с насосной станцией аварийного пожаротушения и другие.

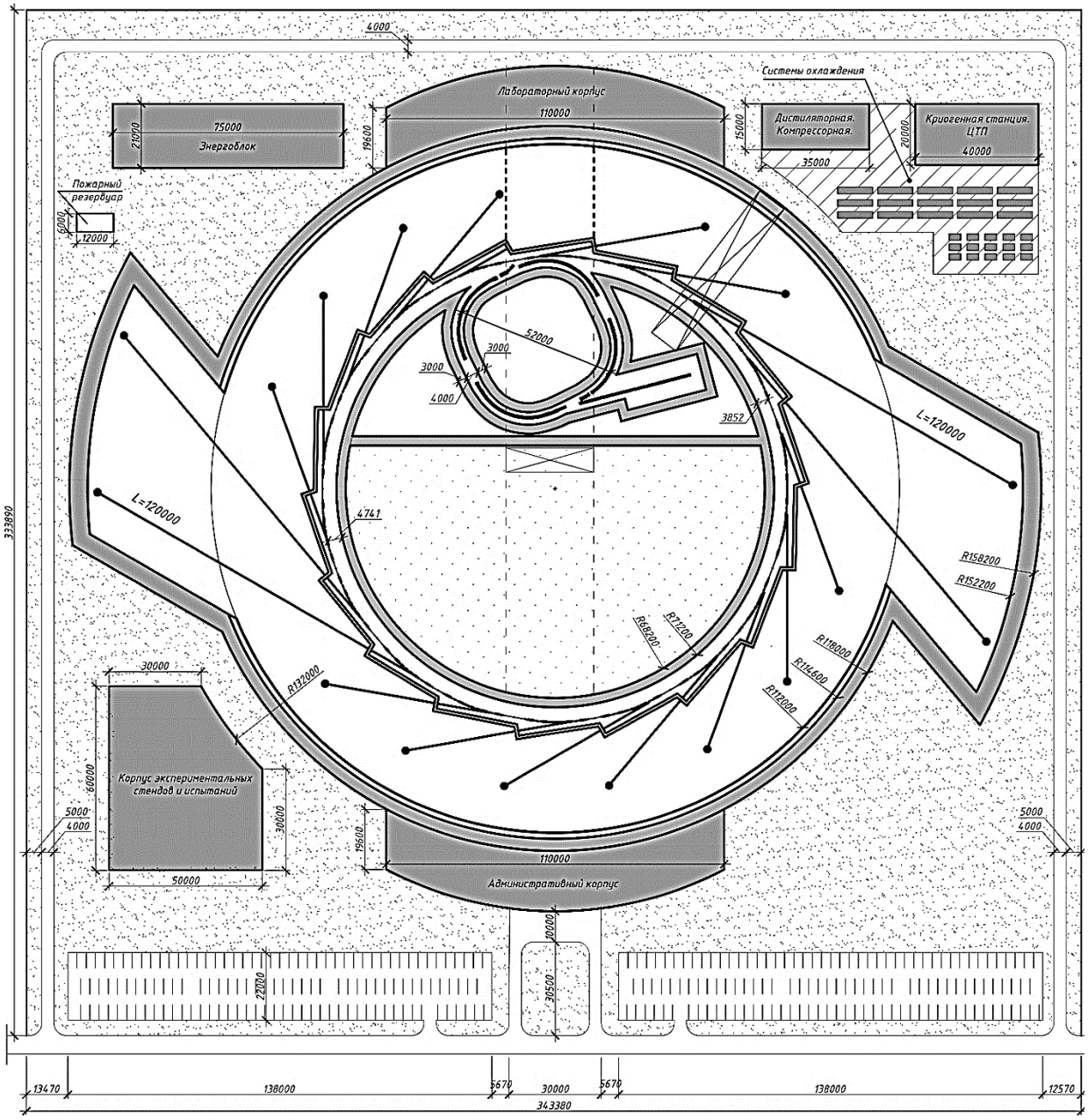

Рисунок 5.1. Комплекс зданий ЦКП «СКИФ» (схема предварительного размещения)

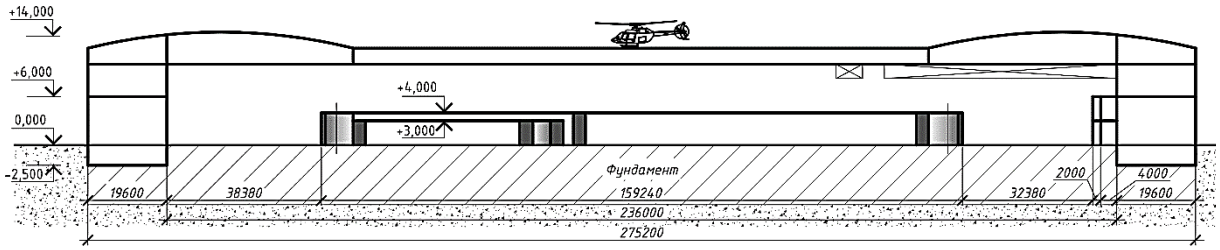

Рисунок 5.2. Кольцевое здание и корпуса ЦКП «СКИФ» в разрезе

При выборе площадки для размещения ЦКП «СКИФ» необходимо учитывать удаленность от источников сейсмических колебаний (рис.5.3).

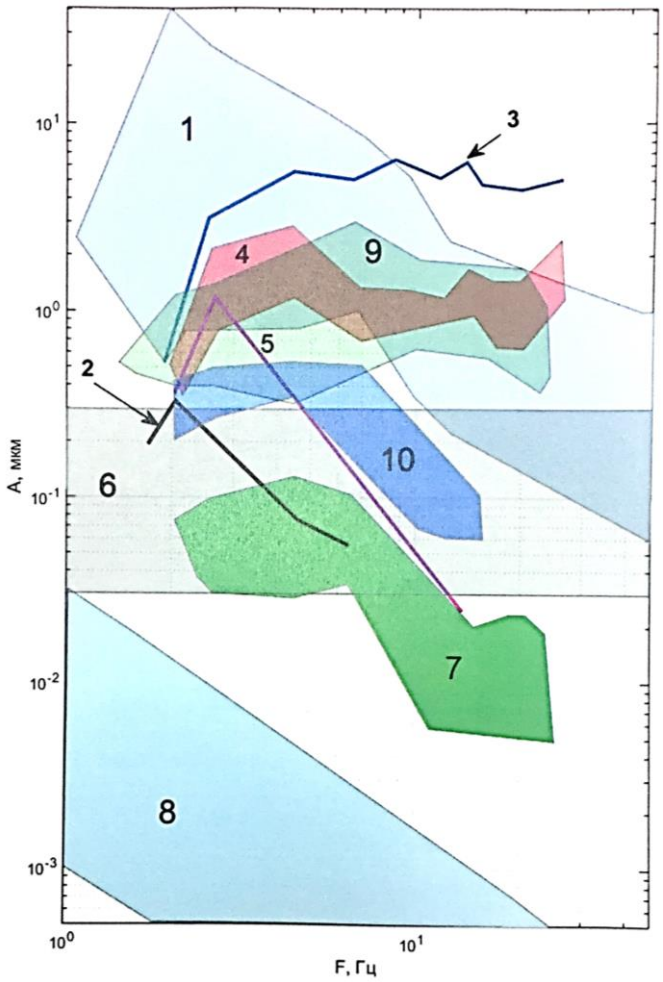

Рисунок 5.3. Амплитудные спектры сейсмических колебаний в г. Новосибирске и его окрестностях (1 – от компрессорных установок и других промышленных установок на расстоянии до 400 м; 2 – то же на расстоянии 10-15 км; 3 – транспортные на расстоянии 17 м; 4 – то же в метро на глубине 17 м; 5 – от промышленных взрывов на расстоянии до 200 км; 6 – средние городские; 7 – сейсмический фон (техногенный) на расстояниях 10-20 км от города; 8 – континентальный шум; 9 – транспортные на расстоянии 50 м от грунтовой дороги; 10 – от самолета)

5.1. Инфраструктура зданий ЦКП «СКИФ»

Кольцевое здание

Кольцевое здание предназначено для размещения ускорительного комплекса и пользовательских станций.

Кольцевое здание разделено на несколько пространственных зон (рис.5.1.1): ускорительная зона, экспериментальный зал, инженерная зона, вспомогательная зона.

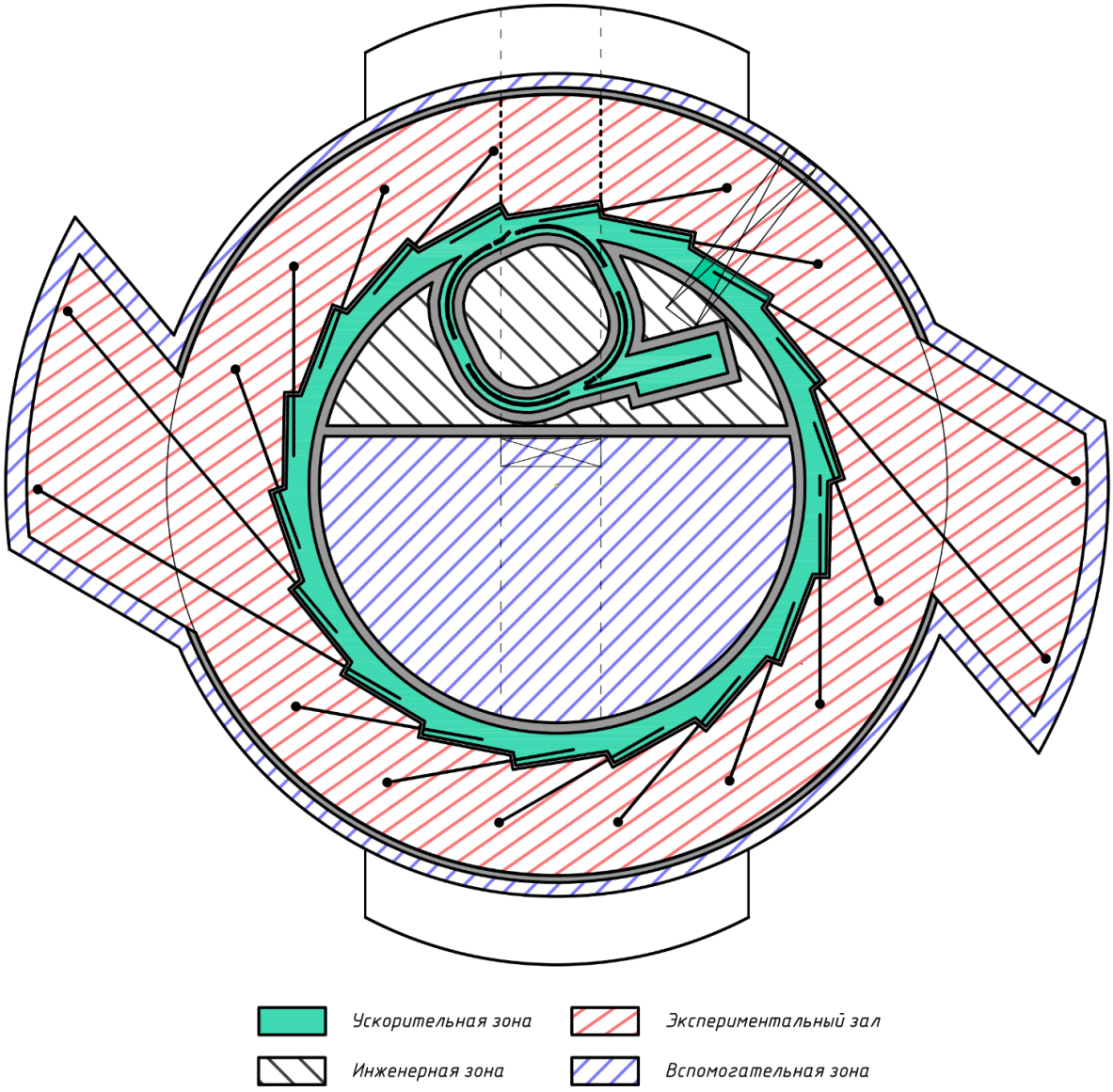

Рисунок 5.1.1. Пространственные зоны кольцевого здания ЦКП «СКИФ»

В ускорительной зоне располагается ускорительный комплекс (линак, бустер, основное кольцо) и системы (источники питания магнитных элементов, источники питания вакуумных насосов, ВЧ генераторы и клистронная галерея, система диагностик).

Экспериментальный зал – пространство вокруг основного кольца между наружной радиационно-защитной стеной тоннеля основного кольца и внешней стеной кольцевого здания, в которой размещаются каналы вывода СИ и пользовательские станции. В проекте ЦКП «СКИФ» предусмотрено создание тридцати экспериментальных станций (6 станций первой очереди и 24 станции второй очереди) с полной длиной основных каналов до 60 метров и с полной длиной специализированных каналов, размещаемых в «крыльях» здания, до 120 метров. Каждая станция СИ территориально отделяется в экспериментальном зале.

Инженерная зона находится в части здания, примыкающей к линаку и бустеру. Источники питания бустера и основного кольца будут размещаться на втором этаже ускорительной зоны (на крыше тоннелей основного кольца и бустера).

В центральной части здания размещаются пультовые бустера и основного кольца, радиопультовые. Здесь же располагается базовая геодезическая сеть, используемая для выставки ускорителей и каналов экспериментальных станций.

Во вспомогательных зданиях и сооружениях ЦКП «СКИФ» размещаются инженерные системы, обеспечивающие работу всего комплекса: насосные станции, компрессоры сжатого воздуха, бесперебойные источники питания, системы охлаждения и другие.

Вспомогательная зона состоит из двух подзон. Внутренняя подзона располагается в центральной части здания. Внешняя подзона, располагающаяся по периметру здания и состоящая из лабораторных и офисных помещений для пользователей станций, играет важную роль в температурной стабилизации экспериментального зала, и функционирует как температурный барьер между внешней средой и экспериментальным залом.

В ускорительной зоне должна обеспечиваться временная и пространственная стабильность синхротронного излучения, генерируемого электронным пучком в основном кольце. Для этого необходимо поддерживать стабилизацию основных параметров (механическая устойчивость, температурная стабильность).

С целью снижения влияния вибраций (в соответствии с современными требованиями для источников СИ, предельно допустимые амплитуды колебаний составляют не более 25 нм) при проектировании кольцевого здания необходимо учитывать следующие требования:

- фундаменты инженерной и вспомогательной зон отделены от фундаментов экспериментального зала и ускорительной зоны;

- удаленное размещение вращающегося оборудования от экспериментального зала и ускорительной зоны,

- применение виброгасителей (гибкие вибровставки и виброоснования), применение оборудования высокого технологического уровня.

- фундамент экспериментального зала и ускорительной зоны выполняется единым, структура фундамента должна обеспечивать минимизацию неравномерной осадки здания и подавление внешних колебаний в диапазоне 5-100 Гц. Под ускорительную зону и экспериментальный зал обычно устанавливаются сваи (1000-1500 штук длиной от 10-15 метров).

Высокие требования на устойчивость электронного пучка, генерирующего СИ, приводят к жестким требованиям на стабильность температур охлаждаемой воды и окружающего воздуха в помещениях ускорительной зоны и на стабильность технических параметров всех систем ускорителей (ВЧ, магнитная, вакуумная и пр.).

В современных источниках СИ требования на температурную стабильность охлаждающей воды и воздуха в тоннелях ± 0.1° С за часовой цикл, стабильность источников питания должна быть не хуже $3 \cdot 10^{-5}$.

Ускорители размещаются в радиационно-защищенных помещениях (тоннели для бустера и основного кольца из бетона, толщина стен и потолка от 80 до 150 см), что обеспечивает радиационную безопасность персонала в соответствии с правилами и нормами законодательства РФ. Для обеспечения транспортировки оборудования и его последующей установки часть радиационных защит должна быть съемной.

Характерные размеры тоннеля синхротронного кольца: ширина – около 5 метров, высота 4 метра, внутренний диаметр около 150 метров, толщина наружной стены около 1.4 метра, толщина внутренней стены 1.16 метра, толщина потолка 1.16 метра. Верхняя часть тоннеля (потолок) частично разборно-съёмная.

Бустерное кольцо (диаметром около 50 метров) размещается в отдельном железобетонном тоннеле, расположенном внутри основного кольца. Характерные размеры тоннеля бустерного кольца: ширина около 3 метров, высота около 3 метров, внутренний диаметр около 47 метров; толщина наружной стены около 0.7 метра, толщина внутренней стены около 0.7 метра, толщина потолка около 0.7 метра. Верхняя часть тоннеля (потолок) частично разборно-съёмная.

Линак размещается в радиационно-защищенном помещении, откуда пучок ускоренных электронов выходит в бустерное кольцо.

Основные размеры тоннелей показаны на рисунке 5.1.2 и в таблице 5.1.1.

Таблица 5.1.1. Основные размеры тоннелей в метрах (основной материал стен – бетон, 2.35 т/м^3)

Размеры	Линак	Бустер	Синхротрон
R	60 (линейный размер)	25	75
W	4	3	5
H	3	3	4
Wi	1 / 1 (бетон) + 0.15 (Pb)	0.7 / 0.1 (Pb) + 0.1 (п/э)	1.16
Wo	1 / 1 (бетон) + 0.15 (Pb)	0.7 / 0.1 (Pb) + 0.1 (п/э)	1.41
Wr	1.1	0.7 / 0.1 (Pb) + 0.1 (п/э)	1.16

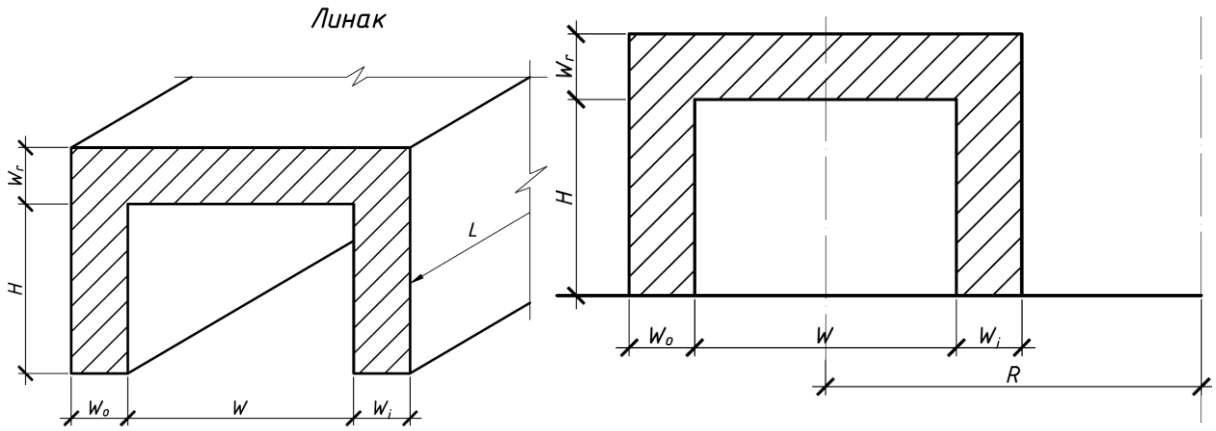

Рисунок 5.1.2. Основные размеры тоннелей (линака, бустера, основного кольца)

На крыше тоннелей ускорителей размещается соответствующее оборудование: источники питания магнитных элементов и вакуумных насосов, диагностическое оборудование. Источники питания и управление станций СИ размещаются на первом этаже экспериментального зала.

Для монтажа ускорительного комплекса и пользовательских станций планируется использовать кольцевой кран грузоподъёмностью 20/3 тонн с пониженной скоростью перемещения. Кран используется для снятия плит перекрытия основного кольца и доставки оборудования внутрь тоннеля.

Кроме того, в здании есть прямолинейный кран грузоподъемностью 20/2 тонн, предназначенный для разгрузки оборудования с грузовых автомобилей в экспериментальном зале на разгрузочной площадке. Этот кран перемещается от лабораторного корпуса до тоннеля бустера, доставляет оборудование внутрь тоннеля бустера и в центральную часть кольцевого здания. Кран перекрывает область впуска-выпуска пучка электронов из бустера в основное кольцо, осуществляет доставку грузов и оборудования в помещения для ВЧ-систем.

Кольцевое здание имеет плоскую крышу в центральной части (высота 12 метров) и скатную крышу над ускорительной зоной и экспериментальным залом (высота 14 метров в верхней точке). На плоской крыше размещены системы водоотведения и вертолетная площадка.

Оценка площади застройки кольцевого здания (без учета лабораторного и административного корпусов) составляет 48 000 м^2, оценка площади здания – 75 000 м^2, оценка строительного объема – 680 000 м^3.

Административный корпус

Административный корпус примыкает к основному кольцевому зданию. Фундамент административного корпуса «развязан» с фундаментом кольцевого здания.

В административном корпусе размещаются офисы административно-управленческого персонала ЦКП «СКИФ», залы переговоров, конференц-зал, приемная для посетителей.

Предварительные поэтажные планы административного корпуса с пространственными зонами показаны на рис.5.1.3, описание пространственных зон приведено в таблице 5.1.2.

В административном корпусе имеется пассажирский и грузопассажирский лифты.

Административный корпус с подвалом и тремя этажами имеет высоту 12 метров, скатную крышу, являющуюся продолжением крыши кольцевого здания.

Оценка площади застройки административного корпуса составляет 2 200 м^2, оценка площади помещений – 7 800 м^2, оценка строительного объема – 32 000 м^3.

Таблица 5.1.2. Пространственные зоны административного корпуса

Обозначение пространственной зоны	Название пространственной зоны	Назначение пространственной зоны	Площадь, м2	Температурный режим, оС	Влажность, %	Давление
1	Приемная	Приемная визитеров	1000	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
2	Конференц-зал	Проведение конференций	600	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
3	Зона отдыха	Зона ожидания и отдыха	600	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
4	Кабинеты руководства	Размещение руководства	600	22 ± 2	50 ± 10	Положительное
5	Офисы	Размещение персонала	400 / 600 / 600	22 ± 2	50 ± 10	Положительное
6	Аудитории	Проведение учебных занятий	200	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
7	Зал Ученого совета	Совещание научно-администр. руководства	1000	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное

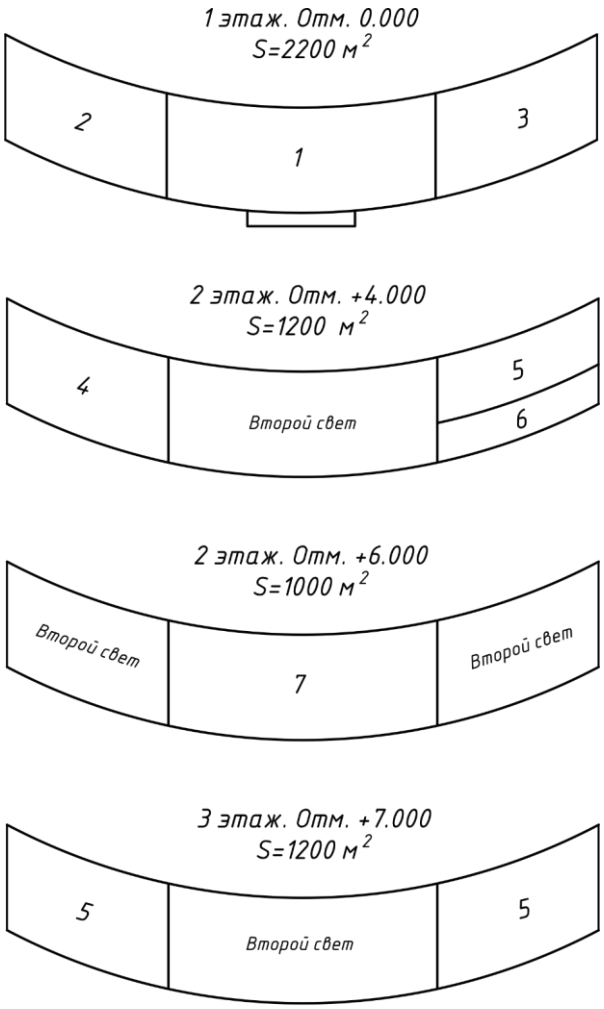

Рисунок 5.1.3. Поэтажные планы административного корпуса ЦКП «СКИФ»

Лабораторный корпус

Лабораторный корпус примыкает к основному кольцевому зданию. Фундаменты лабораторного корпуса «развязаны» с фундаментом кольцевого здания.

В лабораторном корпусе располагаются химические, физические и тематические лаборатории, чистые помещения для подготовки специальных образцов для исследований, механические мастерские, стенды предварительных испытаний образцов, офисы сотрудников ЦКП «СКИФ», участвующих в сборке, запуске основного оборудования ускорительного комплекса и пользовательских станций, поддержке работы ЦКП «СКИФ». Также в лабораторном корпусе предусматривается размещение вычислительного центра для сбора, хранения и анализа данных с ускорительного комплекса и пользовательских станций.

Предварительные поэтажные планы (с пространственными зонами) и разрез лабораторного корпуса показаны на рис.5.1.4, пространственные зоны описаны в таблице 5.1.3.

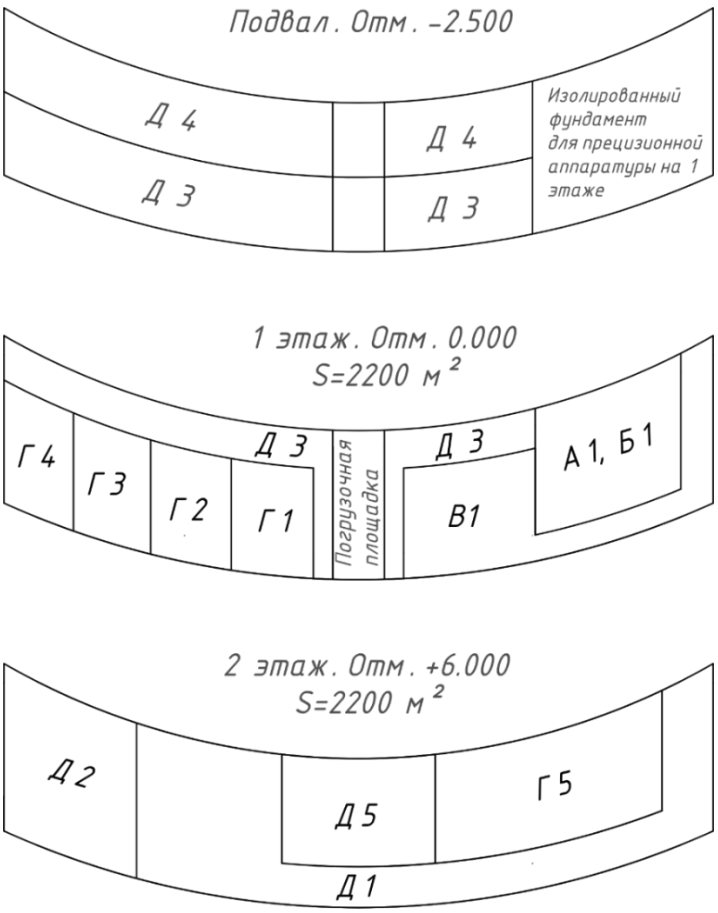

Рисунок 5.1.4. Поэтажные планы лабораторного корпуса

В лабораторном корпусе имеются пассажирский и грузопассажирский лифты.

Лабораторный корпус с подвалом и двумя этажами имеет высоту 12 метров, скатную крышу, являющуюся продолжением крыши кольцевого здания.

Оценка площади застройки лабораторного корпуса составляет 2 200 м^2, оценка площади помещений – 5 200 м^2, оценка строительного объема – 32 000 м^3.

Таблица 5.1.3. Пространственные зоны лабораторного корпуса

Обозначение пространственной зоны	Название пространственной зоны	Назначение пространственной зоны	Класс чистоты	Площадь, $м^2$	Температурный режим, Т, ^{o} С	Влажность, %	Давление
А1	Микроструктурирование	Литографии	ISO 2	100	22 ± 0.5	50 ± 10	Положительное
Б1	Физические лаборатории	Микроскопы, спектрометры, лазеры	ISO 5-6	300	22 ± 0.5	50 ± 10	Положительное
В1	Механическая обработка прецизионная	3D принтеры, ЧПУ	ISO 7-8	500	22 ± 2	50 ± 10	Положительное
Г1	Механическая обработка	Механическая обработка элементов и образцов	ISO 9	220	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Г2	Термоучасток	Сушильные аппараты, автоклав	ISO 9	220	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Г3	Химические лаборатории	Химическая подготовка образцов (мойка, чистка)	ISO 9	220	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Г4	Электро-химические лаборатории	Электро-химическая обработка образцов	ISO 9	220	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Г5	Учебные лаборатории	Проведение учебных занятий на спецустановках (рентгеновские установки и	ISO 9	600	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное

		измерительные приборы)					
Д1	Офисы	Помещения для персонала	Отсутствуют	700	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Д2	Административно-офисные помещения	Учебные аудитории, комнаты для совещаний	Отсутствуют	500	22 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Д3	Склады	Хранение образцов, материалов, химических реактивов	Отсутствуют	~ 600	18 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Д4	Инженерные системы и сети	Размещение инженерного оборудования	Отсутствуют	~ 600	18 ± 2	50 ± 10	Нейтральное
Д5	Вычислительный центр	Центр обработки данных (ЦОД)	Отсутствуют	400	18 ± 2	50 ± 10	Нейтральное

Вспомогательные здания и сооружения

Вспомогательные здания и сооружения служат для размещения инженерно-технологического оборудования и инженерных систем. Окончательный вид и состав зданий и сооружений будет определен в проектной документации.

Энергоблок

Энергоблок предназначен для размещения систем электроснабжения для ЦКП «СКИФ».

Энергоблок представляет собой 2-х этажное здание с подвальным этажом. В энергоблоке на первом этаже расположены трансформаторные подстанции из двух тарнсформаторов 1000 кВА, РУ- 10 кВ, дизельная электростанция для потребителей особой группы I категории. На втором этаже энергоблока располагаются технические, диспетчерские и офисные помещения технического персонала, в подвале расположены кабельные трассы.

Высота здания энергоблока – 11.2 метров.

Оценка площади застройки энергоблока составляет 1 700 м^2, оценка площади здания – 6 200 м^2, оценка строительного объема – 18 200 м^3.

Дистилляторная/компрессорная

В здании дистиляторной/компрессорной размещаются системы производства и распределения сжатого воздуха, приготовления деионизированной (дистиллированной) воды и теплообменные узлы для охлаждения электрофизического оборудования ЦКП «СКИФ», подающие охлаждаемую воду на установки.

Дистиляторная/компрессорная представляет собой 2-х этажное здание с подвальным этажом. На первом этаже размещены шесть теплообменных узлов, насосы, система приготовления дистиллята, компрессорная. На втором этаже располагаются технические, диспетчерские и офисные помещения технического персонала.

В помещениях дистилляторной/компрессорной, предназначенных для размещения теплообменных узлов и системы приготовления дистиллята, размещаются мостовые электрические однобалочные подвесные краны грузоподъемностью 2 тонны, с пониженными скоростями передвижения.

Высота здания дистиляторной/компрессорной – 8 метров.

Оценка площади застройки дистилляторной/компрессорной составляет 525 м^2, оценка площади здания – 1 300 м^2, оценка строительного объема – 4 825 м^3.

Криогенная станция

Криогенная станция предназначена для производства и раздачи криогенных жидкостей для сверхпроводящих и вакуумных систем ЦКП «СКИФ».

В здании криогенной станции размещаются системы производства жидкого гелия и жидкого азота.

Криогенная станция представляет собой 2-х этажное здание с подвальным этажом. На первом этаже расположены системы производства и распределения жидкого азота и жидкого гелия. На втором этаже расположены офисные помещения и подсобные помещения для персонала.

Высота здания криогенной станции – 9 метров.

Оценка площади застройки криогенной станции составляет 800 м^2, оценка площади здания – 1 400 м^2, оценка строительного объема – 7 700 м^3.

Корпус экспериментальных стендов и испытаний

В корпусе экспериментальных стендов и испытаний размещаются экспериментальные стенды для проведения испытаний и подготовки оборудования к установке: стенд магнитных измерений, стенд вакуумных испытаний, стенды испытаний импульсных систем.

Часть корпуса экспериментальных стендов и испытаний используется для временного хранения доставляемого оборудования перед установкой в кольцевом здании.

После введения в эксплуатацию ЦКП «СКИФ» часть площадей в корпусе может быть использования для систем по утилизации используемых энергоресурсов.

Корпус представляет собой 2-х этажное здание с подвальным этажом. На первом этаже находятся экспериментальные стенды, ВЧ стенд, теплые складские помещения. На втором этаже расположены технические и офисные помещения персонала.

В помещениях экспериментальных стендов установлены мостовые электрические краны грузоподъемностью до пяти тонн.

Высота здания корпуса экспериментальных стендов и испытаний – 10 метров.

Оценка площади застройки корпуса экспериментальных стендов и испытаний составляет 2 700 м^2, оценка площади здания – 8 100 м^2, оценка строительного объема – 33 750 м^3.

Пожарный резервуар

Пожарный резервуар размещается в земле на глубине ниже глубины промерзания и предназначен для обеспечения пожарного водоснабжения.

Высота пожарного резервуара – 4.5 метров.

Оценка площади застройки пожарного резервуара составляет 77.5 м^2, оценка строительного объема – 335 м^3.

Площадка для размещения охладительных агрегатов

На площадке для размещения охладительных агрегатов установлены сухие градирни и чиллеры для охлаждения деионизованной воды. Общая мощность охлаждения до 7.5 МВт. Предварительно на площадке планируется установить 15 градирен и 15 чиллеров (по 500 кВт). В теплообменных узлах дистилляторной/компрессорной будут установлены контуры (насосы-градирни-теплообменники), работающие с антифризом.

Оценка площади застройки площадки для размещения охладительных агрегатов составляет 2 000 м^2.

Основные параметры комплекса зданий и сооружений ЦКП «СКИФ»

Площадка для строительства комплекса зданий и сооружений ЦКП «СКИФ» должна выбираться с учетом различных критериев. К критериям, обусловленным требованиями инженерно-строительной инфраструктуры, относятся:

- состояние грунтов (отсутствие грунтовых вод, однородность инженерно-геологического строения, наличие мало-сжимаемых грунтов, минимальные уклоны рельефа);

- удаленность от источников вибраций (аэродромы, железнодорожные узлы и магистрали, автомагистрали, крупные промышленные предприятия);

- наличие энергетических мощностей;

- транспортная доступность.

Основные параметры комплекса зданий и сооружений ЦКП «СКИФ» приведены в таблице 5.1.4.

Таблица 5.1.4. Оценочные значения основных параметров ЦКП «СКИФ»

Параметр	Значение
Площадь застройки, кв.м.	58 000
Площадь зданий и сооружений, кв.м.	105 000
Строительный объем, куб.м.	810 000
Персонал, чел	300
Расход ХВ, куб.м./сут.	46
Расход ГВ, куб.м./сут.	4
Канализационные стоки, куб.м./сут	50
Расход тепла, МВт/год	32 000
Потребляемая электрическая мощность, кВА	19 500

5.2. Инженерные системы ЦКП «СКИФ»

Электроснабжение и электроосвещение

Предварительно выполнены оценки мощности потребления электроэнергии для основных систем ускорительного комплекса и основных инженерных систем зданий и сооружений.

Главными потребителями электроэнергии является нагрузка кольцевого, административного и лабораторного корпусов, энергоблока, корпуса экспериментальных стендов и испытаний, центральный тепловой пункт, дистилляторной/компрессорной, криогенной станции и ускорительно-накопительного комплекса, включающего в себя линейные и ускорительные системы и станции СИ, системы инженерного и компьютерного обеспечения для функционирования и взаимодействия входящих в него основных установок и систем.

Работа всех технологических установок ЦКП «СКИФ» планируется полностью автоматизированной с управлением электронными контроллерами. Работа санитарно-технических и приточно-вытяжных устройств планируется полностью автоматизированной для обеспечения нормальных режимов работы и защиты оборудования в аварийных режимах. Система технологического контроля и управления электрофизическими установками и технологическими установками планируется к размещению в основных зданиях ЦКП «СКИФ». Система противоаварийной защиты должна включать ряд мероприятий, которые совместно с необходимым набором технологического оборудования обеспечат сигнализацию, оповещение по всем рабочим местам и локализацию аварийной ситуации. В зданиях энергоблока, кольцевом здании и здании дистилляторной/компрессорной будут предусмотрены комплектные установки пожаротушения. В здании энергоблока планируется отдельностоящая насосная станция автоматического пожаротушения.

По надежности электроснабжения площадка ЦКП «СКИФ», в целом, относится к I категории по надежности электроснабжения как объект, перерыв электроснабжения которого может повлечь за собой значительный материальный ущерб. Сети аварийного освещения, системы автоматического пожаротушения, компьютерная сеть и лифты относятся к особой группе I категории. Кроме того, потребители аварийного освещения, лифты и компьютерная сеть составляют группу нагрузки, определяющую величину технологической и аварийной брони.

Все остальные потребители на площадке ЦКП «СКИФ» относятся ко II категории по надежности электроснабжения.

Для электропитания предусмотрено распределительное устройство РУ-10 кВ, размещаемое в отдельном помещении в здании энергоблока.

Для питания нагрузок напряжением 0.4 кВ предусматриваются комплектные трансформаторные подстанции, размещаемые в здании энергоблока, каждая из которых состоит из двух трансформаторов мощностью по 1000 кВА напряжением 10/0.4 кВ.

На случай прекращения подачи электроэнергии от электрических сетей требуется собственный автономный источник электроснабжения (технологическая и аварийная бронь).

Наружные сети напряжением 10 кВ планируется прокладывать в подземных коммуникационных тоннелях и кабельных помещениях по кабельным конструкциям. Питающие и распределительные сети напряжением 0.4 кВ будут прокладываться в коммуникационных тоннелях, кабельных помещениях и внутри всех зданий.

Для защиты персонала от поражения электрическим током будут применены меры защиты: защитное заземление, автоматическое отключение питания, уравнивание потенциалов.

Предусматривается устройство рабочего освещения напряжением ~220 В, аварийного освещения (эвакуационного, резервного) напряжением ~220 В и ремонтного - 12 В.

Наружное освещение площадки разбито на участки. Питание каждого участка осуществляется от шкафа управления освещением, установленного в непосредственной близости освещаемого участка территории.

В таблице 5.2.1 приведены основные нагрузки электропотребителей ЦКП «СКИФ».

Таблица 5.2.1. Основные нагрузки электропотребителей ЦКП «СКИФ»

	Основные нагрузки	Электрическая мощность, кВА
Технологическое оборудование	Линак (с основными системами)	240
	Бустер (с основными системами)	1 370
	Основное кольцо (с основными системами)	2 900
	Генераторы СИ (виглеры, ондуляторы, шутеры, дипольные магниты с повышенным полем)	920
	Каналы СИ	1 500
	Оборудование стендов (в отдельном корпусе)	300

	Криогенное оборудование (в здании криогенной станции)	600
	Системы охлаждения в здании дистилляторной/компрессорной (теплообменные узлы, охладители (градирни и чиллеры))	3 200
	Резерв (10%)	1 103
Здания и сооружения	Кольцевое здание (общая и специализированная инженерия)	3 900
	Лабораторный корпус (общая и специализированная инженерия)	2 000
	Административный корпус (общая инженерия)	400
	Энергоблок (общая инженерия)	100
	Дистилляторная/компрессорная (общая инженерия)	100
	Криогенная станция (общая инженерия)	100
	Корпус экспериментальных стендов и испытаний (общая инженерия)	80
	Резерв (10%)	668

Общая потребляемая электрическая мощность ЦКП «СКИФ» оценивается в 19 500 кВА.

Водоснабжение и водоотведение

Водоснабжение обеспечивает хозяйственно-бытовые, производственные и противопожарные нужды комплекса ЦКП «СКИФ».

В ЦКП «СКИФ» запланированы системы: хозяйственно-питьевой противопожарный водопровод; водопровод горячей воды; технический водопровод для приготовления обессоленной воды (дистиллята); производственный циркуляционный водопровод обессоленной воды (дистиллята); производственный циркуляционный водопровод подачи хладоносителя; водопровод автоматического пожаротушения; противопожарный водопровод.

В зданиях ЦКП «СКИФ» проектируется единый хозяйственно-питьевой противопожарный водопровод, обеспечивающий хозяйственно-питьевые, производственные (системы кондиционирования и вентиляции здания) и противопожарные нужды (внутреннее, наружное и автоматическое пожаротушение).

Оценка общего потребления ЦКП «СКИФ» составляет: холодной воды – около 46 $м^3$/сут, горячей воды – около 4 $м^3$/сут, канализационные стоки (водоотведение) – около 50 $м^3$/сут.

Отопление, вентиляция и кондиционирование

Отопление в зданиях и сооружениях ЦКП «СКИФ» осуществляется с помощью приточной вентиляции и водяного отопления.

Водяное отопление выполняется во всех зданиях и сооружениях ЦКП «СКИФ». Отопление с помощью приточной вентиляции выполняется в объемных помещениях кольцевого здания (экспериментальный холл, пультовые и другие).

Температура в основных офисных, лабораторных, административных и бытовых помещениях 22° ± 2° С; влажность 50% ± 10%.

В некоторых помещениях ЦКП «СКИФ» требуется создать специальные условия по чистоте и параметрам внутреннего воздуха. Температура в тоннелях ускорителей 26° ± 0.1° С; влажность 50% ± 10%, пониженное давление 30 Па. Температура в экспериментальном холле 22° ± 0.3° С; влажность 50% ± 10%. Для «чистых помещений» требуется создать избыточное давление 30-40 Па.

Для предотвращения опасности задымления зданий и сооружений, для безопасной эвакуации людей при пожаре будут предусмотрены системы противодымной вентиляции.

Оценки по расходу тепла – 32 000 МВт/год.

Оборотное водоснабжение и охлаждение

Для охлаждения электрофизических установок используется обессоленная вода (дистиллят), которая будет готовиться в здании дистилляторной/компрессорной. Для приготовления обессоленной воды потребуется доочистка исходной воды с целью увеличения удельного сопротивления (не менее 1.0 М Ом/см; окисляемость – не более 1.5 мгO_2/л; содержание железа – менее 0.03 мг/л; содержание меди – не более 0.0005 мг/л).

Для охлаждения ускорительного комплекса и элементов пользовательской инфраструктуры ЦКП «СКИФ» предполагается установка нескольких контуров охлаждения:

№ 1 - охлаждение линака и бустера (источник электронов, линак, магнитная система, вакуумная камера);

№ 2 - охлаждение ВЧ-системы накопителя (резонаторов и генераторов);

№ 3 - охлаждение магнитной системы кольца накопителя (поворотные магниты, ондуляторы, вигглеры);

№ 4 - охлаждение устройств приёма и формирования излучения;

№ 5 - охлаждение источников питания;

№ 6 - охлаждение алюминиевой вакуумной камеры основного кольца.

Теплообменные узлы (контуры охлаждения по воде, хладоносителю сухих градирен/ чиллеров) размещаются в здании дистилляторной/компрессорной.

Каждый контур охлаждения работает в двух режимах: при температуре наружного воздуха $+15^0$C и ниже охлаждение производится с помощью сухого охладителя (драйкуллера); при температуре наружного воздуха выше $+15^0$C охлаждение производится с помощью чиллера.

В таблице 5.2.2 приведены основные нагрузки по охлаждению дистиллятом электрофизического и технологического оборудования.

Таблица 5.2.2. Основные нагрузки по охлаждению дистиллятом

	Основные нагрузки	Мощность охлаждения (вода), кВт
Электрофизическое и технологическое оборудование	Линак (с основными системами)	100
	Бустер (с основными системами)	400
	Основное кольцо (с основными системами)	1740
	Генераторы СИ (виглеры, ондуляторы, шутеры, дипольные магниты с повышенным полем)	340
	Абсорберы и фронтенды	700
	Каналы СИ	1200
	Камера вакуумная	80
	Криогенное оборудование (в здании криогенной станции)	400
	Лабораторный корпус (оборудование, ВЦ)	800
	Стенды (магнитных измерений и пр.)	300
	Резерв (20%)	1212

Общая тепловая мощность, снимаемая с систем оборотной обессоленной водой, составляет около 7 300 кВт.

В таблице 5.2.3 приведены основные нагрузки по охлаждению воздухом электрофизического и технологического оборудования.

Таблица 5.2.3. Основные нагрузки по охлаждению воздухом

	Основные нагрузки	Мощность охлаждения (воздух), кВт
Электрофизическое и технологическое оборудование	Линак (с основными системами)	10
	Бустер (с основными системами)	40
	Основное кольцо (с основными системами)	180
	Генераторы СИ (виглеры, ондуляторы, шутеры, дипольные магниты с повышенным полем)	40
	Абсорберы и фронтенды	70
	Каналы СИ	120
	Камера вакуумная	10
	Криогенное оборудование (в здании Криогенная станции)	40
	Лабораторный корпус (оборудование, ВЦ)	80
	Стенды (магнитных измерений и пр.)	30
	Резерв (20%)	125

Общая тепловая мощность, снимаемая с систем воздухом, составляет 750 кВт.

Газоснабжение (сжатый воздух, криогенные жидкости/газы, газы)

Снабжение лабораторных и технологических помещений ЦКП «СКИФ» сжатым воздухом осуществляется от дистилляторной/компрессорной, где размещается компрессорная станция. Сжатый воздух с параметрами (давление до 14 бар; температура + 20^0C, сухой, безмасляный) предназначен для работы аварийных шиберов, профилактической чистки физических приборов и оборудования.

Для работы криогенного оборудования ЦКП «СКИФ» требуются криогенные жидкости и газы. Криогенные жидкости и газы приготавливаются в здании криогенной станции. Расход криогенных жидкостей/газов будет уточняться по мере проработки и эксплуатации сверхпроводящего оборудования.

Технологические газы используются в процессе строительства и работы ЦКП «СКИФ». Перечень газов и их потребление будут уточняться по мере эксплуатации оборудования.

5.3. Персонал ЦКП «СКИФ»

Планируемое количество персонала ЦКП «СКИФ» и пользователей экспериментальных станций СИ к моменту выхода на проектную мощность составляет:

- персонал ЦКП «СКИФ»:

научные сотрудники – 100 человек;

инженерно-технический и вспомогательный персонал – 170 человек;

административно-управленческий персонал – 30 человек;

- внешние пользователи экспериментальных станций СИ – 100 - 150 человек.

Примерный перечень профессионально-квалификационного состава: научные сотрудники; инженеры-исследователи; инженеры-программисты; лаборанты и операторы экспериментальных установок и стендов; вспомогательный персонал.

Безопасность персонала, пользователей и населения (радиационная, экологическая, пожарная и пр.)

При строительстве и последующей эксплуатации необходимо выполнять меры безопасности в отношении персонала и пользователей ЦКП «СКИФ», а также населения, находящегося вблизи комплекса.

В соответствии с требованиями Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности (СП 2.6.1.2612-10 ОСПОРБ -99/ 2010) и Гигиеническими требованиями к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ (СанПиН 2.6.1.2573-10) ЦКП «СКИФ» должен быть оснащен системой контроля доступа персонала, системой радиационных блокировок, также должен осуществляться радиационный контроль.

С учетом большого количества эксплуатационных станций – каналов вывода СИ (30) и размеров самого комплекса необходимо постоянное размещение персонала радиационного контроля и радиационной безопасности на объекте.

Радиационные правила безопасности предусматривают следующие предельные дозы для персонала (группа А и группа Б) и населения: 20 мЗв/год, 5 мЗв/год и 1 мЗв/год соответственно при продолжительности работы при односменной работе 1700 ч/год (персонал группы А), 2000 ч/год (персонал группы Б).

Величины мощности эквивалентной дозы, используемые при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения:

- для персонала группы А: 6 мкЗв/ч для помещений постоянного пребывания персонала; 12 мкЗв/ч для помещений периодического пребывания персонала; пределы допустимой дозы 20 мЗв/год и продолжительности работы 1700 ч/год;

- для персонала группы Б: 1.2 мкЗв/ч на рабочих местах вблизи от источников ионизирующего излучения; пределы допустимой дозы 5 мЗв/год и продолжительности работы 2000 ч/год;

- для населения: 1.2 мкЗв/ч для территории, прилегающей к наружным стенам здания ускорителя; 0.06 мкЗв/ч для любых помещений вне территории объекта; пределы допустимой дозы 1 мЗв/год.

Параметры радиационно-защитных элементов должны обеспечивать безопасность персонала на рабочих местах и населения вблизи ЦКП «СКИФ».

Основными источниками радиационной опасности являются:

- тормозное излучение, генерируемое при потере электронного пучка на элементах ускорителя или на остаточном газе в вакуумном объеме. Основное излучение направлено в сторону первоначального движения электронного пучка, однако, поперечное направление является существенным и должно рассматриваться тоже;

- генерация нейтронов при высоко-энергетичном тормозном излучении. Образуются нейтроны при взаимодействии тормозного излучения с тяжелыми металлами. В диапазоне энергии фотонов 7-20 МэВ образуются нейтроны «гигантского» резонанса со средней энергией около 2 МэВ и изотропным распределением. При энергии фотонов тормозного излучения выше 50 МэВ генерируются не-изотропные высокоэнергичные (более 25 МэВ) нейтроны.

- синхротронное излучение, создаваемое электронами при ускорении/замедлении в генераторах излучения (поворотные дипольные магниты, встроенные устройства)

Для расчетов рассматриваются следующие сценарии потерь (таблица 5.3.1).

Таблица 5.3.1. Потери электронного пучка

Расположение места потерь	% потерь пучка
Синхротронное кольцо	10%
Бустерное кольцо	2%
Инжекция/экстракция (бустер-основное кольцо)	50%
Инжекция/экстракция (линак-бустер)	50%
Приемник пучка (бустер)	100%

При работе источника ЦКП «СКИФ» используются технологические химические вещества: легковоспламеняющиеся, окислители, нестабильные реактивные, токсичные (смертельная концентрация от 200 ppm до 3000 ppm), высокотоксичные (смертельная концентрация 200 ppm и меньше), корродирующие. Кроме того, могут использоваться опасные газы: легковоспламеняющиеся, высокотоксичные, токсичные, окисляющие. Предельные объемы опасных химикатов при хранении и использовании определяются требованиями безопасности при проектировании.

Вопросы пожарной безопасности решаются с помощью систем автоматической сигнализации, автоматического пожаротушения, средств индивидуальной защиты персонала.

6. Принципиальный план-график реализации проекта

Проекты создания исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс» – это многоступенчатые процессы детализации, согласования и принятия решений. Принятие стратегических решений по этапам реализации проекта основывается на полученных к текущему моменту результатах, отечественном и международном опыте организаций-участников. Окончание каждой стадии проекта сопровождается ключевым решением, планированием работ, сроков и финансового обеспечения следующей стадии.

Этап 1, Стадия 1: Разработка концепции

Длительность: ориентировочно – до конца 2018 года.

Задачи стадии 1:

1. Подготовка основополагающего документа о создании ЦКП «СКИФ», определяющего организационно-правовую форму, структуру управления и каналы финансирования.
2. Анализ текущих мировых разработок в технологиях создания источников СИ четвёртого поколения.
3. Выбор оптической структуры кольца, определение основных параметров источника СИ ЦКП «СКИФ» и сценариев его работы на пользователей.
4. Определение списка инфраструктурных объектов и требований к ним (объекты ускорительного комплекса, инженерно-строительной инфраструктуры, экспериментальной инфраструктуры).
5. Определение критических параметров и компонентов, от которых зависит успешная реализации проекта.
6. Составление целей, задач и сроков выполнения следующей стадии.
7. Составление сметы следующей стадии.

Ключевое решение 1 (КР1)

- Принципиальные возможности и технические параметры ускорительного комплекса, инженерно-строительной и экспериментальной инфраструктуры;
- Предварительный план-график создания ЦКП «СКИФ»;
- Объем и механизмы финансирования проекта;
- Связь с другими проектами;
- Выработка критериев эффективности проекта.
- Объем работ, который необходимо выполнить для принятия КР2.
- Утверждение сметы следующей стадии.

Итоговый документ стадии 1: концептуальный проект ЦКП «СКИФ».

Этап 1, Стадия 2: Разработка детальной технической документации

Длительность: 24 месяца, ориентировочно – до конца 2020 года.

Задачи стадии 2:

1. Создание структуры управления проектом.
2. Финальная проработка параметров ускорительного комплекса.
3. Разработка технического дизайна основных компонентов и узлов ускорительного комплекса.
4. Изготовление специализированных стендов и прототипов критических компонентов (в том числе, комплектов оснастки и подготовки технологических линий для последующего производства серийных узлов).
5. Разработка технического дизайна экспериментальных станций первой очереди.
6. Разработка проектно-сметной документации и технических требований к зданию ЦКП «СКИФ» и объектам инженерно-строительной инфраструктуры, определенных КР1.
7. Развертывание системы качества, контроля. Определение последовательности процедур, тестов и испытаний.
8. Составление целей, задач и сроков выполнения следующей стадии.
9. Составление сметы следующей стадии.

Ключевое решение 2 (КР 2)

- Запуск выполнения основного объема работ по созданию ЦКП «СКИФ»;
- Корректировка целей и задач проекта исходя из текущей ситуации;
- Утверждение объемов и механизмов финансирования следующей стадии проекта;
- Утверждение объема работ, который необходимо выполнить для принятия КР3.

Итоговый документ стадии 2: технический проект ЦКП «СКИФ», включающий проектно-сметную документацию.

Этап 1, Стадия 3: Создание ЦКП «СКИФ» (ускорительный комплекс, инженерно-строительная инфраструктура, лабораторный корпус и экспериментальные станции первой очереди)

Длительность: 36 месяцев, ориентировочно – к началу 2024 года.

Задачи стадии 3:

1. Строительство зданий и сооружений ЦКП «СКИФ».

2. Создание ускорителя и подготовка к физическому запуску.

3. Создание экспериментальных станций первой очереди и лабораторий. Подготовка их к физическому запуску.

Ключевое решение 3 (КР 3)

- Готовность ЦКП «СКИФ» к запуску и работе на пользователей;
- Корректировка организационной структуры, которая в дальнейшем будет управлять ЦКП «СКИФ»;
- Утверждение объемов и механизмов финансирования следующей стадии проекта;
- Торжественное открытие ЦКП «СКИФ».

Итоговый документ этапа 1: заключение уполномоченной комиссии о готовности ЦКП «СКИФ» к началу работ на пользователей.

Этап 2, Стадия 4: Выход ЦКП «СКИФ» на проектную мощность

Длительность: 120 месяцев, ориентировочно – к началу 2034 года.

Задачи стадии 4:

1. Доведение всех параметров ускорительного комплекса до проектных, включая надежную работу на пользователей не менее 6000 часов в год (с первых лет работы).
2. Создание и запуск экспериментальных станций второй очереди.
3. Проведение экспериментальных исследований на станциях первой очереди и запущенных станциях второй очереди.
4. Проведение на работающем ускорительном комплексе исследований возможности превзойти проектные параметры.

Ключевое решение 4 (КР 4)

- Готовность ЦКП «СКИФ» к работе на проектной мощности;
- Выполнение показателей и индикаторов программы синхротронных и нейтронных исследований;
- Утверждение сметы следующей стадии.

Итоговый документ стадии 4: акт ввода в эксплуатацию.

Этап 2, Стадия 5: Функционирование ЦКП «СКИФ» на проектной мощности

Длительность: 25 лет.

Задачи стадии 5:

1. Выполнение фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований в интересах отечественной науки и отечественного наукоемкого бизнеса.

Ключевое решение 5 (КР 5)

- Модернизация ЦКП «СКИФ».

Сводные планы реализации проекта ЦКП «СКИФ»

В таблице 6.1 представлен сводный план разработки и создания ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ», в таблице 6.2 – сводный план разработки и создания экспериментальных станций, в таблице 6.3 – сводный план создания инженерно-строительной инфраструктуры.

Таблица 6.1. Предварительный план разработки и создания ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ»

Годы:	2	0	1	9	2	0	2	0	2	0	2	1	2	0	2	2	2	0	2	3	2	0	2	4
Кварталы:	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Запуск с пучком, получение параметров																							M8	
Физический пуск																	M7							
Монтаж, выставка																								
Тесты																								
Серийное изготовление											M6													
Создание/модернизация стендов																								
Конструирование, прототипирование					M4		M5																	
Проектирование, общие виды	M1		M2	M3																				

Ключевые точки:

M1: утверждена концепция и магнитная структура
M2: завершено научное проектирование
M3: начало выдачи технических заданий в НКО
M4: определены все изготовители
M5: начало выдачи чертежей в производство
M6: первые серийные элементы
M7: здание готово к приему оборудования
M8: начало экспериментов

Таблица 6.2. Предварительный план разработки и создания экспериментальных станций ЦКП «СКИФ»

Годы:	**2**	**0**	**1**	**9**	**2**	**0**	**2**	**0**	**2**	**0**	**2**	**1**	**2**	**0**	**2**	**2**	**2**	**0**	**2**	**3**	**2**	**0**	**2**	**4**
Кварталы:	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Запуск с пучком, получение параметров																							1	1
Физический пуск																				1	1	1		
Монтаж / выставка																		1	1	1	1	1		
Тесты													1	1	1	1	1	1	1	1				
Стенды											1	1	1	1	1	1	1	1						2
Изготовление							1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						2	2	2
Конструирование, прототипирование			1	1	1	1	1	1	1	1									2	2	2	2	2	2
Проектирование, общие виды	1	1	1	1	1	1											2	2	2	2	2	2	2	2

1 – экспериментальные станции первой очереди
2 – экспериментальные станции второй очереди

Таблица 6.3. Предварительный план разработки и создания инженерно-строительной инфраструктуры ЦКП «СКИФ»

Годы:	**2**	**0**	**1**	**9**	**2**	**0**	**2**	**0**	**2**	**0**	**2**	**1**	**2**	**0**	**2**	**2**	**2**	**0**	**2**	**3**	**2**	**0**	**2**	**4**
Кварталы:	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Ввод в эксплуатацию																								
Окончание строительства																								
Пуско-наладка (инженерных систем)																	M7							
Строительно-монтажные работы																								
Разрешение Строительства																								
(Строительное) Проектирование (рабочая документация)																								
Государственная экспертиза Проекта																								
(Строительное) Проектирование (стадия П)																								
Инженерные изыскания (на площадке)																								
Оформление земли (площадка под строительство)																								
Ключевая точка M7: здание готово к приему оборудования																								

7. Стоимость проекта, требуемая вспомогательная инфраструктура

Оценка полной стоимости проекта:

Необходимое финансирование 1-й очереди проекта до ввода в эксплуатацию (здание синхротрона, лабораторный и административный корпуса, ускорительный комплекс, 6 экспериментальных станций 1-й очереди, задел на 2-ю очередь) составляет порядка 40 млрд. рублей. Развитие исследовательской инфраструктуры (2-я очередь проекта) потребует дополнительно порядка 27 млрд. руб.

Оценка стоимости стадии 1: Разработка концепции

Работы на данной стадии могут быть выполнены за счёт внутренних средств ИЯФ СО РАН.

Оценка стоимости стадии 2: Проработка проекта

Стоимость стадии 2 определится в результате разработанной концепции проекта на стадии 1. Ориентировочная стоимость технической проработки систем и узлов линейного ускорителя, бустера, транспортных каналов, основного кольца, вставных систем, инженерной инфраструктуры, зданий и сооружений, а также фронтэндов каналов и пользовательских станций около 3 млрд. руб. Следует отметить, что указанная сумма включает создание прототипов элементов магнитных структур и пользовательских станций.

Следует отметить, что в эту стоимость включены затраты на проектные работы, включая вибрационные исследования грунтов. Эти исследования являются ключевыми как для достижения проектных параметров источника СИ (в первую очередь – эмиттанса), так и для принципиальной возможности будущей модернизации.

Оценка стоимости стадии 3: Выполнение проекта

Стоимость стадии 3 будет определена в результате проработки проекта на стадии 2. Окончательная смета может быть составлена только после того как будут выполнены проектно-изыскательские работы и подготовленный проект пройдёт госэкспертизу.

Средние затраты только на ускорительную часть проекта, используя опыт предыдущих проектов NSLS-II, ALBA, SOLEIL, DIAMOND и MAX IV, составляют примерно 2,1 млн. руб. за метр периметра основного кольца. Для периметра основного кольца в 477 метров это составляет порядка 9 млрд. рублей. В эту стоимость также

включены затраты на линейный ускоритель, бустер на полную энергию, транспортные каналы. Вместе со встроенными устройствами генерации СИ для экспериментальных станций первой очереди, разработкой 4-х типов фронтэндов и создание фронтэндов для экспериментальных станций первой очереди, а также системой питания и управления оценочная стоимость составит порядка 13 млрд. руб.

Оценка стоимости зданий (основного кольца, лабораторного корпуса, вспомогательных инфраструктурных и офисных помещений), а также коммуникаций, транспортной и инженерной инфраструктуры, включая дополнительную биозащиту для генераторов жёсткого рентгеновского излучения, а также подготовки специализированных помещений для длинных экспериментальных станций, разработка и ввод в эксплуатацию аварийных систем, систем защиты и контроля составляет порядка 12 млрд. руб.

Стоимость экспериментальных станций сильно варьируется в зависимости от решаемых задач и может составлять от 150 млн. руб. до 1,5 млрд. руб. за экспериментальную станцию. Создание пользовательских станций первой очереди, оборудование лабораторного корпуса, включая создание вычислительного центра для предобработки данных, полученных на экспериментальных станциях, разработку технологических процессов пробоподготовки и проведения сопутствующих исследований, а также начало разработки экспериментальных станций второй очереди оценивается в 7,6 млрд. руб.

Оценочная стоимость реализации проекта в период 2019-2024 годы (таблица 7.1) составит **39 500,0 млн. рублей**, в том числе:

- проектные и изыскательские работы, включая сейсмические исследования, исследования электромагнитного фона, расчет радиационных защит, проект инженерно-строительной инфраструктуры, разработку физического проекта (включая разработку специализированных стендов для ключевых конструкций и узлов) в период 2019-2022 гг. – 3 200 млн. рублей, из них подготовка проектов шести станций первой очереди – 120 млн. руб.; подготовка проектов семи экспериментальных станций второй очереди в период 2024 г. – 140 млн. рублей;
- строительно-монтажные работы в период 2021-2024 гг. – 7 000 млн. рублей;
- оснащение оборудованием, включая инженерные системы в период 2021-2024 гг. – 5 000 млн. рублей, ускорительный комплекс в период 2021-2024 гг. – 13 000 млн. рублей, лабораторный корпус в период 2021-2024 гг. – 2 600 млн. рублей, экспериментальные станции первой очереди в период 2021-2024 гг. – 5 000 млн. рублей, экспериментальные станции второй очереди в период 2024 г. – 860 млн. рублей;

- эксплуатационные расходы (2023-2024 годы) – 2 700 млн. рублей.

Предельная сумма финансирования проекта в период 2019-2024 гг. в ценах 2018 г. с учетом дефляторов и рисков составляет **50 000 млн. рублей**, в том числе:

- проектно-изыскательские работы в период 2019-2021 гг. – 3 200 млн. рублей, подготовка проектов семи экспериментальных станций второй очереди в период 2024 г. – 210 млн. рублей;
- строительно-монтажные работы в период 2021-2024 гг. – 9 000 млн. рублей;
- оснащение оборудованием в период 2021-2024 гг. – 33 990 млн рублей;
- эксплуатационные расходы (2023-2024 годы) – 3 600 млн. рублей.

Конечная смета будет получена по результатам проектно-изыскательских работ и государственной экспертизы. В рамках проекта могут быть найдены решения, которые позволят уменьшить предельную сумму финансирования проекта с учетом дефляторов и рисков. Структура и направления расходования средств в 2019 году представлены в таблице 7.2.

Технологический аудит проекта в размере 0.2% от суммы проектно-изыскательских работ (что составляет 6.4 млн рублей) в соответствии с п. 11 Постановления Правительства Российской Федерации от 12 августа 2008 г. №590 целесообразно провести в 2018 году на основе подготовленного эскизного проекта.

Таблица 7.1. Оценка стоимости проекта по годам до ввода в эксплуатацию, включая трудозатраты и накладные расходы, млн. руб.

Состав работ	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Итого по работам
Разработка проектов, модернизация стендов, создание прототипов							
Разработка проекта ускорительной части и пользовательских станций	300	300	300			140	**1 040**
Разработка проекта зданий и инженерной инфраструктуры	300	180	350	290			**1 120**
Модернизация испытательных стендов	300	150	130				**580**
Создание прототипов критических узлов	100	500					**600**
Строительство							
Строительство зданий, инженерной и транспортной инфраструктуры			4 100	5 000	2 500	400 1 кв.	**12 000**
Создание ускорительного комплекса			4 400	5 000	3 300	300 1 кв.	**13 000**
Создание станций 1-й очереди и вспомогательной исследовательской инфраструктуры			2 000	2 500	2 500	460 1 кв.	**7 460**
Создание станций 2-й очереди (начала 2-й очереди реализации проекта)						1 000	**1 000**
Эксплуатация							
Эксплуатационные расходы					1 000	1 700	**2 700**
Итого по годам	**1 000**	**1 130**	**11 280**	**12 790**	**9 300**	**4 000**	**39 500**

Таблица 7.2. Структура и направление расходования средств в 2019 году с указанием возможного исполнителя работ

Направление расходования средств		**Обоснование**	**Сумма, млн. руб.**	**Организация-исполнитель**
Разработка проекта ускорительного комплекса		Финансирование разработки проекта источника электронов, бустерного синхротрона, накопителя электронов (основного кольца) и систем инжекции и транспортировки пучков электронов (авансирование).	180	ИЯФ СО РАН
Разработка пользовательских станций 1-й очереди				
1.	Станция 1-1 «Микрофокус»	Финансирование необходимо для начала (авансирования) проектных работ по экспериментальным станциям	10	ИГМ СО РАН, ИХБФМ СО РАН
2.	Станция 1-2 «Структурная диагностика»		10	ИК СО РАН, НГУ
3.	Станция 1-3 исследования быстропротекающих процессов		10	ИГиЛ СО РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ
4.	Станция 1-4 «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»		10	ИК СО РАН, ИЯФ СО РАН
5.	Станция 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»		10	ИЯФ СО РАН, ИЦиГ СО РАН
6.	Станция 1-6 «Электронная структура»		10	ИК СО РАН, ИНХ СО РАН
Разработка проекта лабораторного корпуса, включая разработку технологических процессов		Финансирование необходимо для разработки комплекса технологических процессов по пробоподготовке и выполнению сопутствующих (предпучковых) исследований в лабораторном комплексе ЦКП «СКИФ»	60	ИК СО РАН, НГУ, ИФП СО РАН, ИХБФМ СО РАН

Проведение инженерных изысканий, включая сейсмические исследования, исследования электромагнитного фона, расчет радиационных защит		Финансирование необходимо для подготовки проектных работ по ЦКП «СКИФ»	120	Проектная организация ГК «Росатом», ИК СО РАН
Первая стадия проектирования инженерно-строительной инфраструктуры зданий и сооружений ЦКП «СКИФ»		Финансирование необходимо для начала (авансирования) проектных работ по инженерно-строительной инфраструктуре	180	Проектная организация ГК «Росатом»
Модернизация испытательных стендов, включая разработку проектов (20% от суммы) и закупку материалов и оборудования (80 % от суммы)				
1.	Стенд испытаний ВЧ резонаторов и генераторов	Модернизацию испытательных стендов необходимо провести на этапе проектирования с тем, чтобы к моменту создания первых узлов объекта ЦКП «СКИФ» стенды были полнофункциональными	70	ИЯФ СО РАН
2.	Стенд магнитных измерений		85	
3.	Стенд импульсных магнитных измерений		40	
4.	Стенд испытаний сверхпроводящих магнитных систем		70	
5.	Стенд испытания прецизионных источников питания		35	
Разработка технологических решений, разработка и создание прототипов критических узлов магнитных элементов, вакуумной системы и ВЧ системы ускорительного комплекса (закупки материалов составляют 70% от суммы).		Прототипы критических узлов и элементов необходимо начать изготавливать на этапе проектирования с тем, чтобы подготовить и настроить испытательные стенды на максимально эффективную работу с элементами инжекторов и ускорителей, а также ВЧ-систем. Вторая цель работ по прототипированию заключается в подготовке и апробации производственных процессов для создания ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ» нового поколения	100	ИЯФ СО РАН
		Итого:	**1 000**	

Расходы после ввода в эксплуатацию

Расходы после запуска включают в себя эксплуатационные расходы, заработную плату персонала (из расчета 300 человек), налоговые отчисления и составляют 1 700 млн. руб. в год (таблица 7.3). С учётом необходимости развития исследовательской инфраструктуры (вторая очередь проекта), расходы составят 2 700 млн. руб. в год

Таблица 7.3. Годовой эксплуатационный бюджет, без учета создания экспериментальных станций 2-ой очереди

Статья расходов	**Млн. руб.**
Обслуживание и расходные материалы на ускорительный комплекс	390
Обслуживание и расходные материалы на инженерную и пользовательскую инфраструктуру	390
Заработная плата персонала (из расчёта 300 человек)	360
Коммунальные расходы, налоговые отчисления	560
Итого	**1 700**

7.1. Инженерно-строительная инфраструктура

Таблица 7.1.1. Оценочная стоимость инженерно-строительной инфраструктуры ЦКП «СКИФ», включая подготовку к проекту, проектирование и создание.

Название работы	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Инженерно-изыскательские работы (на строительной площадке)	120
Проектирование (строительное – без конструирования «технологического оборудования» – ускорительный комплекс, экспериментальные станции 1-й очереди)	900
Государственная экспертиза «полного» проекта («физический проект» (технологическое оборудование), строительный проект)	100
Строительно-монтажные работы (без монтажа и стоимости технологического оборудования (ускорительный комплекс, экспериментальные станции 1-й очереди)	12 000
Проектирование и создание экспериментальных станций 2-й очереди	1 140
Итого:	**14 260**

7.2. Ускорительный комплекс

Таблица 7.2.1. Оценочная стоимость создания ускорительного комплекса, включая проектирование и прототипирование

Название системы	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Накопитель	
Проектирование, включая «технологическое оборудование»	1390
Магниты и подставки	2660
Вакуумная система	1370
Система выставки	150
Источники питания	930
ВЧ система	680
Электроника/диагностика	1390
Система безопасности	200
Инжектор	
Проектирование, включая «технологическое оборудование»	690
Линак и источник электронов	920
Каналы транспортировки	540
Магниты и подставки бустера	1150
Вакуумная система	210
Система выставки	30
Источники питания	300
ВЧ система	280
Электроника/диагностика	260
Система безопасности	40
Система управления	1890
Итого:	**15 080**

7.3. Экспериментальные станции первой очереди

Таблица 7.3.1. Оценочная стоимость оборудования станции «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»

Название системы	**Назначение системы**	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Секция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»	Исследование электронной, локальной и магнитной структуры кристаллических и аморфных веществ, а также жидкостей, растворов, молекулярных кристаллов, примесей в сплавах, тяжелых элементов в биологической матрице с содержанием анализируемого элемента до 0.001%.	200
Оптическая система станции (оптический хатч)	Формирование пучков СИ с необходимыми пространственными и энергетическими характеристиками.	400
Вакуумная система и система детектирования	Проведение пучка СИ от выхода из фронтэнда до исследуемых образцов	50
Система управления и контроля	Унифицированная система управления станцией и обеспечения безопасности экспериментальных исследований	20
Инженерная инфраструктура станции	Обеспечение бесперебойного функционирования экспериментальной станции	50
Монтаж экспериментальной станции	Работы по монтажу экспериментальной станции	20
	Итого:	**740**

Таблица 7.3.2. Оценочная стоимость оборудования станции «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

Название системы	**Назначение системы**	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Секция «Рентгеновской микроскопии и томографии»	Исследование трехмерной структуры объектов с микрометровым и субмикрометровым разрешением	180
Секция «Исследования материалов при высоких давлениях и температуре»	Исследования материалов при высоких давлениях и температуре	220
Секция «Фазово-контрастной радиографии»	Исследование структуры образцов основанных на фазовых изображениях объекта	290
Оптическая система станции (оптический хатч)	Формирование пучков СИ с необходимыми пространственными и энергетическими характеристиками.	90
Вакуумная система и система детектирования	Проведение пучка СИ от выхода из фронтэнда до исследуемых образцов	35
Система управления и контроля	Унифицированная система управления станцией и обеспечения безопасности экспериментальных исследований	20
Инженерная инфраструктура станции	Обеспечение бесперебойного функционирования экспериментальной станции	10
Монтаж экспериментальной станции	Работы по монтажу экспериментальной станции	20
	Итого:	**865**

Таблица 7.3.3. Оценочная стоимость оборудования станции «Электронная структура»

Название системы	**Назначение системы**	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Секция «Электронная структура»	Исследование электронной структуры методами РФЭС, РСП, РЭС	400
Секция «Фотоэлектронная спектроскопия высокого давления»	Исследование объектов методом РФЭС при давлении близком к окружающей среде	110
Секция «Рефлектометрия»	Аттестация и калибровка оптических элементов и детекторов рентгеновского излучения	165
Оптическая система станции (оптический хатч)	Формирование пучков СИ с необходимыми пространственными и энергетическими характеристиками.	300
Вакуумная система и система детектирования	Проведение пучка СИ от выхода из фронтэнда до исследуемых образцов	30
Система управления и контроля	Унифицированная система управления станцией и обеспечения безопасности экспериментальных исследований	20
Инженерная инфраструктура станции	Обеспечение бесперебойного функционирования экспериментальной станции	10
Монтаж экспериментальной станции	Работы по монтажу экспериментальной станции	20
	Итого:	**1 055**

Таблица 7.3.4. Оценочная стоимость оборудования станции «Структурная диагностика»

Название систем	**Назначение**	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Секция «Дифрактометрия высокого разрешения»	Исследование синтетических, геологических, биологических соединений и функциональных материалов с целью установления их фазового состава, кристаллической структуры и/или ближнего порядка, микроструктуры и их изменения	340
Секция «Монокристальный РСА»	Определение кристаллической структуры образцов, исследование которых с использованием стандартных лабораторных дифрактометров крайне затруднено, либо полностью нереализуемо.	115
Секция «Исследования *in situ* в условиях повышенных температур и различных газовых средах»	Массовые дифракционные исследования поведения веществ и материалов в условиях воздействия высоких температур в различных газовых средах	190
Секция «Малоугловое рентгеновское рассеяние»	Исследование жидких и твердых дисперсных систем, полимеров, биологических объектов, гетерогенных химических реакций, определение структурно-дисперсных характеристик искомой фазы в многокомпонентных материалах	145
Оптическая система станции (оптический хатч)	Формирование пучков СИ с необходимыми пространственными и энергетическими характеристиками.	160
Вакуумная система и система детектирования	Проведение пучка СИ от выхода из фронтэнда до исследуемых образцов	40
Система управления и контроля	Унифицированная система управления станцией и обеспечения безопасности экспериментальных исследований	20
Инженерная инфраструктура станции	Обеспечение бесперебойного функционирования экспериментальной станции	15
Монтаж экспериментальной станции	Работы по монтажу экспериментальной станции	20
	Итого:	**1 045**

Таблица 7.3.5. Оценочная стоимость оборудования станции исследования быстропротекающих процессов

Название систем	**Назначение**	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Секция динамических процессов	Исследование механики и химии взрывных и ударно-волновых процессов	180
Секция «Плазма»	Исследование воздействия пучков лазерного излучения и частиц на материалы	160
Секция экстремально высоких температур	Исследования атомной структуры и фазовых переходов в веществе при высоких температурах (до 5 000 С)	120
Оптическая система станции (оптический хатч)	Формирование пучков СИ с необходимыми пространственными и энергетическими характеристиками.	100
Вакуумная система и система детектирования	Проведение пучка СИ от выхода из фронтэнда до исследуемых образцов	40
Система управления и контроля	Унифицированная система управления станцией и обеспечения безопасности экспериментальных исследований	20
Инженерная инфраструктура станции	Обеспечение бесперебойного функционирования экспериментальной станции	60
Монтаж экспериментальной станции	Работы по монтажу экспериментальной станции	20
	Итого:	**700**

Таблица 7.3.6. Оценочная стоимость оборудования станции «Микрофокус»

Название системы	**Назначение системы**	**Оценочная стоимость оборудования/ работ, млн. руб.**
Секция «Макромолекулярная кристаллография»	Исследование кристаллизованных биологических объектов малого размера.	150
Секция «Элементный анализ и экстремальные условия»	Исследование объектов малого размера в условиях экстремальных давлений и температур.	130
Секция «Гамма-резонанс»	Исследование веществ методом ядерного гамма-резонанса (мёссбауэровской спектроскопии).	40
Оптическая система станции (оптический хатч)	Формирование пучков СИ с необходимыми пространственными и энергетическими характеристиками.	130
Вакуумная система и система детектирования	Проведение пучка СИ от выхода из фронтэнда до исследуемых образцов	30
Система управления и контроля	Унифицированная система управления станцией и обеспечения безопасности экспериментальных исследований	20
Инженерная инфраструктура станции	Обеспечение бесперебойного функционирования экспериментальной станции	10
Монтаж экспериментальной станции	Работы по монтажу экспериментальной станции	20
	Итого:	**530**

7.4. Лабораторный корпус

Таблица 7.4.1. Оценка стоимости оборудования лабораторного корпуса

Обозначение пространственной зоны	Название пространственной зоны	Назначение пространственной зоны	Оценочная стоимость оборудования, млн. руб.
А1	Микроструктурирование	Литография, размещение специализированных электронных микроскопов	845
Б1	Физические лаборатории	Размещение оборудования для физических исследований образцов	650
В1	Механическая обработка прецизионная	Аддитивные технологии, прецизионная обработка	210
Г1	Механическая обработка	Механическая обработка элементов и образцов	80
Г2	Термоучасток	Термическая подготовка и обработка образцов	100
Г3	Химические лаборатории	Химическая подготовка и обработка образцов	80
Г4	Электро-химические лаборатории	Электро-химическая обработка образцов	80
Г5	Учебные лаборатории	Проведение учебных занятий на специализированном оборудовании	180
Д1	Офисы	Помещения для персонала	30
Д2	Административно-офисные помещения	Учебные аудитории, комнаты для совещаний	70
Д3	Склады	Хранение образцов, материалов, химических реактивов	50
Д4	Инженерные системы и сети	Размещение инженерного оборудования	50
Д5	Вычислительный центр	Центр обработки данных (ЦОД)	100
		Итого:	**2 525**