

УДК 621.384.639

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ “СИБИРСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ИСТОЧНИК ФОТОНОВ” (ЦКП “СКИФ”)

© 2022 г. А. В. Бухтияров^{1,3,4}, В. И. Бухтияров⁴, А. Н. Журавлев^{1,2}, К. В. Золотарев^{1,2,3},
Я. В. Зубавичус^{1,3,4}, Е. Б. Левичев^{1,2,*}, Н. А. Мезенцев^{1,2}, А. Д. Николенко^{1,2},
П. А. Пиминов^{1,2}, И. Н. Чуркин²

¹ ЦКП “СКИФ”, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: E.B.Levichev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 16.04.2022 г.

Представлены основные технические решения, выбранные для реализации проекта источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП “СКИФ”, сооружаемого в настоящее время в г. Новосибирске. Описан выбор конфигурации и параметров источника синхротронного излучения, рассмотрены принципы формирования научной программы, обсуждаются устройства генерации излучения, конструкция каналов вывода излучения, инженерная инфраструктура.

DOI: 10.31857/S0023476122050022

ОГЛАВЛЕНИЕ

- Введение
- 1. Базовые принципы формирования научной программы ЦКП “СКИФ”
- 2. Ускорительный комплекс ЦКП “СКИФ”
 - 2.1. Конфигурация комплекса и магнитная структура накопителя
 - 2.2. Основные аспекты динамики источника СИ СКИФ
 - 2.3. Основные технические системы источника СИ СКИФ
 - 2.3.1. Система инжекции
 - 2.3.2. Магнитная система накопителя СКИФ
 - 2.3.3. Вакуумная система накопителя СКИФ
 - 2.3.4. Ускоряющие резонаторы ЦКП “СКИФ”
- 3. Устройства генерации излучений и фронтенды для вывода СИ
 - 3.1. Устройства генерации излучений
 - 3.2. Фронтенды и каналы вывода СИ для станций первой очереди
- 4. Инженерно-строительная инфраструктура ЦКП “СКИФ”
- Заключение

ВВЕДЕНИЕ

В феврале 2018 г. В.В. Путин, проводя заседание Совета по науке при Президенте РФ в Новосибирском Академгородке, одобрил инициативу сибирских ученых по созданию здесь современного источника синхротронного излучения (СИ). Параметры новой установки были утверждены в октябре 2019 г. на заседании Совета Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры. Государственным заказчиком (застройщиком) нового научного комплекса класса “большая наука” Правительством РФ был определен Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, а сам источник СИ получил наименование Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов” (ЦКП “СКИФ”).

Государственный контракт на проектно-исследовательские работы был заключен в апреле 2020 г. с АО “Центральный проектно-технологический институт”, входящим в компанию “ТВЭЛ” госкорпорации “Росатом”, и в конце 2021 г. по результатам работы АО “ЦПТИ” было получено положительное заключение ФАУ “Главгосэкспертиза России” на проектно-сметную документацию ЦКП “СКИФ”. Генеральным подрядчи-

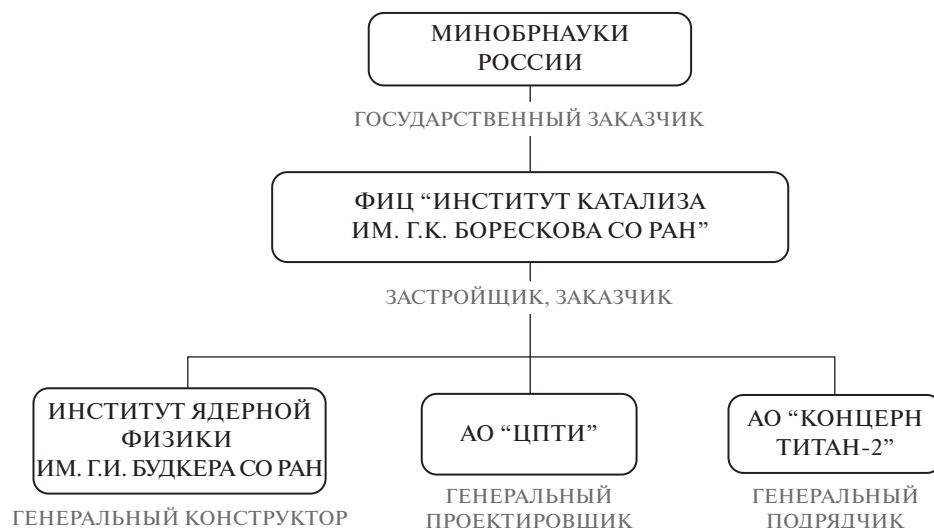


Рис. 1. Организационная диаграмма реализации проекта источника СИ ЦКП "СКИФ".

ком уникального проекта был выбран АО "КОНЦЕРН ТИТАН-2".

С ноября 2021 г. в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН активно ведутся разработка, проектирование и изготовление оборудования ускорительного комплекса ЦКП "СКИФ". Организационная диаграмма исполнения проекта ЦКП "СКИФ" показана на рис. 1.

ЦКП "СКИФ" – источник СИ поколения 4+, создаваемый в наукограде Кольцово под Новосибирском. Ускорительный комплекс ЦКП "СКИФ" состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ, синхротрона-бустера на полную энергию и накопительного кольца. Накопитель релятивистских электронов с энергией 3 ГэВ, периметром 476 м и сверхмалым расчетным горизонтальным эмиттансом 73.2 пкм·рад (без учета токовых эффектов, связи бетатронных колебаний и вставных устройств) будет поставлять пучки СИ с предельной яркостью в диапазоне от 100 эВ до 100 кэВ на 30 экспериментальных станций. Для энергии фотонов ~1.5 кэВ эмиттанс источника приближается к волновому (дифракционному) пределу, обеспечивая высокую степень когерентности СИ и расширяя потенциал исследовательского комплекса.

В предлагаемом обзоре обсуждаются различные аспекты реализации ЦКП "СКИФ", включая ускорительно-накопительный комплекс, источники излучения, пользовательскую и инженерную инфраструктуры.

1. БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ЦКП "СКИФ"

Экспериментальными станциями "СКИФ" первой очереди являются станции 1-1 "Микро-

фокус", 1-2 "Структурная диагностика", 1-3 "Быстропротекающие процессы", 1-4 "XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм", 1-5 "Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне" и 1-6 "Электронная структура", схематично показанные на рис. 2. Из соображений безопасности и экспериментальных особенностей часть оборудования станций 1-3 "Быстропротекающие процессы" и 1-5 "Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне" вынесена в отдельные здания.

Источник ЦКП "СКИФ" после выхода на проектные параметры будет работать в режиме 24×7 , за исключением периодов планово-профилактических работ. Прогнозируемое время работы ускорительного комплекса для пользователей составляет до 6500 ч в год. Доступ пользовательских групп к секциям станций первой очереди будет предоставлен по мере их ввода в эксплуатацию. Всего в состав ЦКП "СКИФ" может войти до 30 экспериментальных станций, 14 станций будут использовать излучение специальных многополюсных магнитных устройств генерации (вигглеров и ондуляторов) в прямолинейных промежутках, а 16 будут размещены на каналах вывода из поворотных магнитов.

Основной задачей функционирования ЦКП "СКИФ" станет инфраструктурное обеспечение фундаментальных и прикладных исследований научных и образовательных организаций, а также организаций реального сектора экономики, выступающих в роли пользователей, с целью обеспечения лидерства в приоритетных областях научно-технологического развития Российской Федерации. Инфраструктура ЦКП "СКИФ" будет использована для выполнения исследований мирового уровня в различных областях физики,

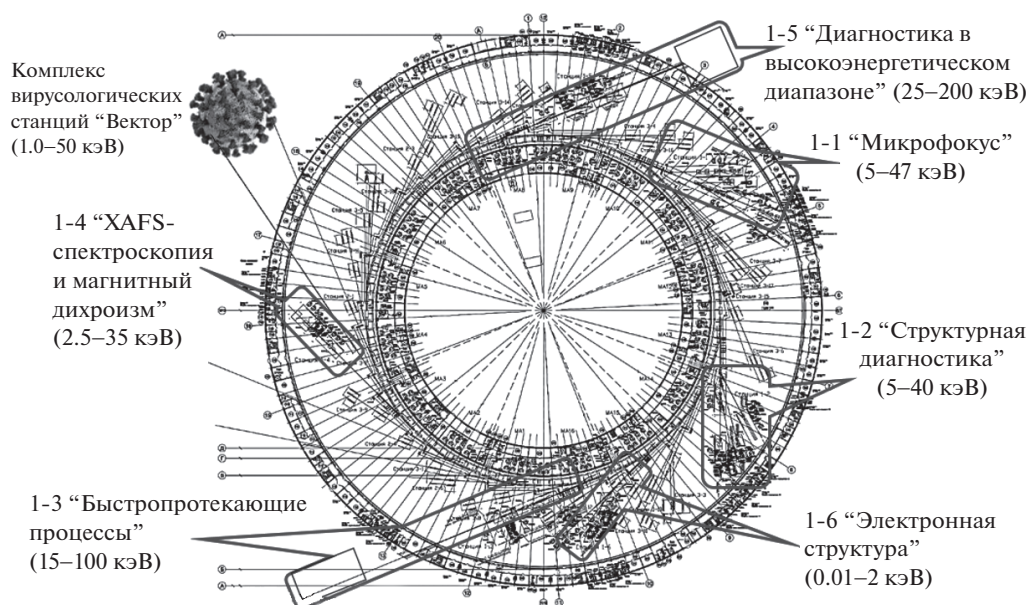


Рис. 2. Схема размещения первых шести экспериментальных станций в здании основного накопителя ЦКП "СКИФ". Показана вирусологическая станция "Вектор", рассматриваемая дополнительно.

химии, материаловедения, молекулярной биологии, медицины и других дисциплин с акцентом на наиболее прорывные, экономически и социально-значимые мультидисциплинарные задачи.

В области фундаментальных наук приоритетными направлениями деятельности ЦКП "СКИФ" являются: развитие научных основ создания новых материалов с заданными свойствами (включая композитные и гибридные) на основе знания их структуры; исследование механизмов функционирования живых систем, в том числе развитие бионических подходов к дизайну технических систем; развитие методологии синхротронной диагностики для эффективной реализации инновационных технологических цепочек "от идеи к коммерческому продукту"; развитие экспериментальной аппаратуры и методик обработки больших данных, в том числе для исследования ударно-волновых воздействий на вещества и материалы; структурный дизайн новых лекарственных средств для борьбы с социально значимыми заболеваниями, развитие методов медицинской диагностики и терапии; моделирование геологических и геофизических процессов в недрах Земли и планет; поиск решений глобальных экологических проблем, включая исследования материалов для альтернативной энергетики (водородной, солнечной, термоядерной).

В области поисковых и прикладных исследований в интересах организаций реального сектора экономики приоритетными направлениями деятельности ЦКП "СКИФ" будут: исследования новых функциональных материалов с целью оптимизации их эксплуатационных характеристик

и создания на их основе высокотехнологичных устройств (сверхпроводимость, молекулярная электроника, спинтроника, топливные элементы, аккумуляторы, промышленные катализаторы, полимеры и композиты); медико-биологические исследования (поиск новых фармацевтических препаратов белковой природы, разработка новых систем целевой доставки лекарственных препаратов, исследования физиологического отклика на терапевтическое вмешательство методами "рентгеновского кино", исследования в области нейрофизиологии и когнитивных процессов, развитие технологий биосовместимых материалов для протезирования); развитие новых технологий обработки конструкционных материалов (электронная и лазерная сварка, аддитивные, ионно-плазменные технологии), формирования защитных износ-, коррозионно- и термостойких покрытий.

Особое внимание в рамках реализации программы прикладных исследований ЦКП "СКИФ" будет уделено внедрению научных результатов в реальный сектор экономики (нефтегазовая промышленность, экологический катализ, фармацевтика, машиностроение, добыча и переработка минерального сырья и другие).

Важной частью научной программы ЦКП "СКИФ" будет решение стратегических задач, связанных с обеспечением национальной безопасности и повышением обороноспособности России. Работы будут осуществляться в интересах предприятий Государственной корпорации "Росатом", Российских федеральных ядерных центров – Всероссийского научно-исследователь-

ского института технической физики им. академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск) и Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (г. Саров) совместно с Институтом гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Институтом теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск): выявление кинетических параметров и химических механизмов быстрых и сверхбыстрых неравновесных процессов (взрыв, фронт горения, ударная волна, мощное импульсное лазерное воздействие); структурная диагностика конструкционных материалов, предназначенных для работы в экстремальных условиях (авиастроение, космос, материалы для атомной и термоядерной энергетики); анализ механизмов разрушения и деградации (развитие напряжений, циклические деформационные нагрузки, усталостное разрушение, возникновение трещин, трение и износ, радиационное охрупчивание, коррозия) с целью повышения их эксплуатационных характеристик; повышение радиационной стойкости элементной базы и изделий микроэлектроники для критических приложений (космос, атомная и термоядерная энергетика); повышение удельной энергонасыщенности материалов и композитов.

Будет реализована обширная программа, нацеленная на обеспечение национальной биологической безопасности, в частности связанная с исследованиями объектов высокой степени патогенности, нацеленная на ускоренную разработку новых высокоэффективных вакцин, антибактериальных и противовирусных препаратов, совместно с ФБУН ГНЦ ВБ “Вектор” Роспотребнадзора (Кольцово).

Совместно с ведущими сибирскими вузами, включая Новосибирский государственный, Новосибирский государственный технический университеты, Томский государственный, Томский политехнический университеты, Сибирский федеральный, Сибирский государственный университеты и другие, будут реализованы программы подготовки научных и инженерно-технических специалистов высокой квалификации с использованием самой передовой исследовательской инфраструктуры, нацеленной на получение результатов мирового уровня. Студенты инженерного профиля будут привлечены к проектированию нового оборудования синхротронных станций для наиболее быстрого и эффективного внедрения в практику.

Решение задач, поставленных перед научным коллективом ЦКП “СКИФ”, окажется невозможным без предельного уровня информатизации и интеллектуализации процессов получения новых научных знаний на этой установке с широким использованием технологий искусственного

интеллекта в цепочках управления данными с целью быстрого получения конечных результатов исследования.

Текущая оценка потребностей в ИТ-ресурсах центра обработки данных экспериментальных станций и прогноз их роста выглядят следующим образом: вычислительная производительность кластера к моменту ввода ЦКП “СКИФ” в эксплуатацию — не менее 200 терафлопс на базе CPU-вычислителей и не менее 500 терафлопс на базе GPU-ускорителей с ростом до 8 петафлопс к 2030 г.; суммарная скорость поступления “сверхгорячих” первичных “сырых” экспериментальных, пропускная способность каналов обмена информации с вычислительными узлами 128 Гб/с (рост до 200 к 2030 г.); объем “сверхгорячих” детекторных экспериментальных данных для кратковременного хранения — 240 Тб в сутки (рост до 1.5 Пб к 2030 г.); объем долговременного “теплого” хранения экспериментальных данных — 4 Пб в год (рост до 80 Пб к 2030 г.).

2. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ЦКП “СКИФ”

Источниками СИ (циклическими) служат накопители электронов с характерной энергией несколько гигаэлектронвольт и длиной орбиты до 1–2 км. В таких установках интенсивные (ток несколько сотен миллиампер) пучки заряженных частиц, обладающие очень малым фазовым объемом — эмиттансом, двигаясь в поперечном магнитном поле, создают мощное и яркое излучение, которое по каналам вывода поступает на большое число экспериментальных станций для проведения исследований.

Важными “потребительскими” характеристиками источника СИ являются яркость и когерентность излучения. Чем больше яркость и когерентная фракция потока фотонов, тем выше “качество” установки и тем больший интерес она представляет для исследователей.

Яркость определяется как поток фотонов, нормированный на единицу площади и телесного угла источника. В идеальной оптической системе яркость сохраняется, поэтому ее удобно использовать в качестве критерия при построении схемы эксперимента. Как правило, для измерений нужен узкий диапазон спектра СИ $\Delta\lambda$ в окрестности длины волны λ , который вырезает монохроматор, поэтому удобно определить спектральную яркость как

$$B \sim \frac{\dot{N}(\lambda)}{\sum_x \sum_{x'} \sum_y \sum_{y'} (\Delta\lambda/\lambda)}, \quad (1)$$

где \dot{N} — число фотонов в единицу времени (поток), а $\sum_{x,y}$ и $\sum_{x',y'}$ — эффективные пространственный и угловой размеры источника излучения по

горизонталы и вертикали, учитывающие вклад и электронного, и фотонного пучков.

Поперечный среднеквадратичный размер $\sigma_{x,y}$ и угловая расходимость пучка электронов $\sigma_{x',y'}$ определяют фазовый объем – эмиттанс – согласно $\varepsilon_{x,y} = \sigma_{x,y}\sigma_{x',y'}$, и из (1) следует, что для повышения яркости источника СИ эмиттанс пучка электронов необходимо уменьшать. Однако волновой характер излучения накладывает ограничение на пространственный Δx и угловой $\Delta\psi$ размеры источника с длиной волны λ согласно $\Delta x \sim \lambda/\Delta\psi$ [1]. Это значит, что даже в случае точечного электрона эмиттанс ограничен дифракционными эффектами на уровне $\varepsilon_r \approx \Delta x \Delta\psi \sim \lambda$. Более точно в случае излучения одиночного электрона в ондуляторе длиной L среднеквадратичный размер и расходимость источника излучения записываются как [2]:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{2\lambda L}}{4\pi}, \quad \sigma_{r'} = \sqrt{\frac{\lambda}{2L}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения ондулятора на оси, и радиационный фазовый объем такого источника

$$\sigma_r \sigma_{r'} = \lambda/4\pi. \quad (3)$$

Таким образом, накладывается естественный предел на величину эмиттанса электронного пучка в циклическом источнике СИ – не имеет смысла делать его меньше (3), поскольку рост яркости будет незначительным, а сложность сооружения источника возрастает в высокой степени. Поскольку волновой эмиттанс зависит от длины волны излучения, для оценки обычно берут наиболее востребованный пользователями диапазон от $\lambda \sim 10 \text{ \AA}$ (мягкий рентген), что дает $\varepsilon_r \sim 100 \text{ пкм}\cdot\text{рад}$, до $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ (жесткий рентген) с $\varepsilon_r \sim 10 \text{ пкм}\cdot\text{рад}$.

Предельно малый эмиттанс позволяет получить излучение с высокой степенью пространственной когерентности, которая для пучка из ондулятора определяется как

$$\xi = \frac{\varepsilon_r^2}{\sum_x \sum_{x'} \sum_y \sum_{y'}}.$$

Использование когерентного излучения позволяет расширить исследовательские возможности установки.

Одним из важнейших факторов, определивших конфигурацию и параметры источника СИ “СКИФ”, является очень короткий срок, отведенный на реализацию проекта, что заставляет уменьшать как размер установки, так и объем работ по расчету, проектированию, прототипированию, изучению и доработке оборудования комплекса, поскольку на это просто нет времени. В связи с этим мы вынуждены максимально при-

менять предыдущие разработки Института ядерной физики (ИЯФ), по которым есть опыт, проектная и конструкторская документация, производственное оборудование и приспособления. Было принято решение использовать в качестве основных установок инжекционного комплекса линейный ускоритель электронов с энергией 200 МэВ, аналогичный линаку ВЭПП-5 [3] – инжектору электронно-позитронных коллайдеров ИЯФ, и бустерный синхротрон [4], который был разработан и изготовлен в ИЯФ для проекта источника СИ NSLS II. При учете изложенных выше соображений, пожеланий экспериментаторов, размеров участка для размещения источника СИ, оптимизации бюджета и графика реализации были сформулированы следующие исходные требования к источнику СИ ЦКП “СКИФ”: энергия пучка 3 ГэВ; периметр накопителя менее 500 м; натуральный эмиттанс менее 100 пкм·рад; инжектор (разработка ИЯФ) – бустер-синхротрон источника СИ NSLS II и линейный ускоритель, который используется в ИЯФ для инжекции в e^+e^- -коллайдеры; достаточное число каналов вывода СИ из ондуляторов и вигглеров, а также из поворотных магнитов с “большим” полем (жесткий рентген) и с “малым” полем (мягкий рентген и ультрафиолет); по возможности простые, проверенные и надежные решения (например, отказ от сложных магнитов с продольным градиентом поля, традиционная инжекция с горизонтальным отклонением накопленного пучка (bump) импульсными магнитами на азимуте инжекции).

Эти требования легли в основу разработки ускорительного комплекса. “СКИФ” может работать в одногустковом (с током до 20 мА) или многогустковом (с током пучка до 400 мА) режимах и обслуживать до 30 экспериментальных станций. На накопителе предполагается установить до 14 специальных генераторов излучения – вигглеров и ондуляторов (в том числе сверхпроводящих), которые значительно улучшают спектральные характеристики источника СИ. С учетом тока пучка, бетатронной связи и вставных устройств эмиттанс может быть дополнительно уменьшен до $\sim 50\text{--}60 \text{ пкм}\cdot\text{рад}$, что позволит достичь волнового предела в востребованной экспериментаторами области мягкого рентгеновского излучения и позволит называть ЦКП “СКИФ” источником поколения 4+.

2.1. Конфигурация комплекса и магнитная структура накопителя

Перечисленные выше соображения определили конфигурацию (рис. 3) и основные характеристики ускорительного комплекса источника СИ “СКИФ”, который состоит из линейного ускорителя – форинжектора, бустерного синхротрона с длиной орбиты 158.7 м и частотой повторения ин-

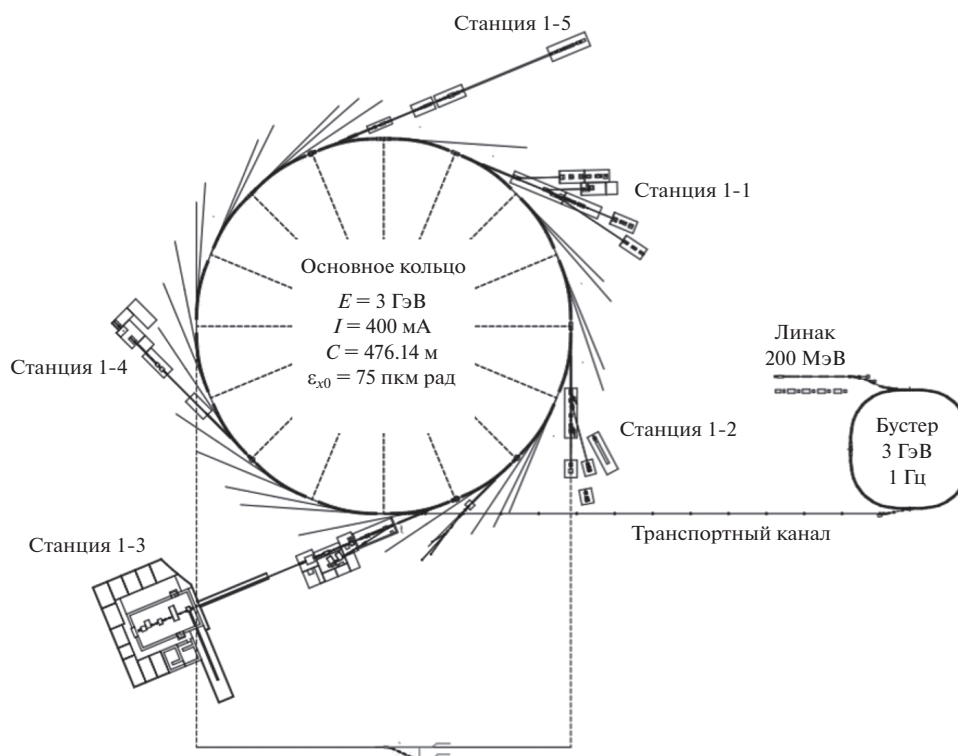


Рис. 3. Конфигурация и характеристики источника СИ четвертого поколения “СКИФ”. Кроме основных установок ускорительного комплекса показан ряд экспериментальных станций.

жекционного цикла 1 Гц, основного кольца с периметром 476.14 м и 16 прямолинейными промежутками длиной 6 м. В двух промежутках планируется разместить ускоряющие резонаторы и оборудование инжекции, а оставшиеся 14 использовать для постановки “вставных устройств” – вигглеров и ондуляторов.

Магнитная структура (или структура магнитной системы) типа МВА (multi-bend achromat) всех 16 суперпериодов идентична. Элементарная ячейка базируется на одном магните со слабым поперечным отрицательным градиентом [5]. В каждом из суперпериодов один из магнитов (в центральной ячейке) создает “большое” поле 2 Тл, что позволяет выводить из него излучение с достаточно жестким спектром.

Особое внимание уделено простоте и высокой серийности магнитных элементов, что способствует скорости реализации комплекса. Не используются сложные магниты с продольным градиентом поля. Поперечный градиент в поворотных магнитах мал (около -10 Тл/м), что делает их простыми в изготовлении, измерении и настройке. Диполь с большим полем изготовлен с плоскими полюсами на постоянных магнитах и со слабой корректирующей токовой обмоткой. Магниты с обратной кривизной орбиты (reverse bend), способствующие минимизации эмиттанса,

представляют собой смещенные поперечно короткие квадрупольные линзы, не требующие сложных технологических подходов для оптимизации и изготовления. Число типов магнитных элементов сведено к минимуму. Так, для получения динамической апертуры и энергетического акцептанса, достаточных для требуемого времени жизни пучка и простой, эффективной инжекции, используют всего два семейства секступольных линз.

Магнитная структура “СКИФ” состоит из 16 суперпериодов типа 7ВА с пятью регулярными ячейками и двумя – на краях суперпериода – для зануления дисперсионной функции в прямолинейном промежутке. Два квадрупольных дублета настраивают в центре промежутка достаточно большую β_x (для оптимизации горизонтальной инжекции) и достаточно малую β_y (для уменьшения влияния вигглеров и ондуляторов с вертикальным полем на динамику пучка) бетатронные функции. Такая наиболее простая конфигурация прямолинейного промежутка считается базовой (рис. 4). В табл. 1 приведены основные параметры всего накопительного кольца.

Магнитная структура, показанная на рис. 4, проста, удовлетворяет основным требованиям, предъявленным выше, обладает высокой степенью симметрии и, следовательно, минимальным

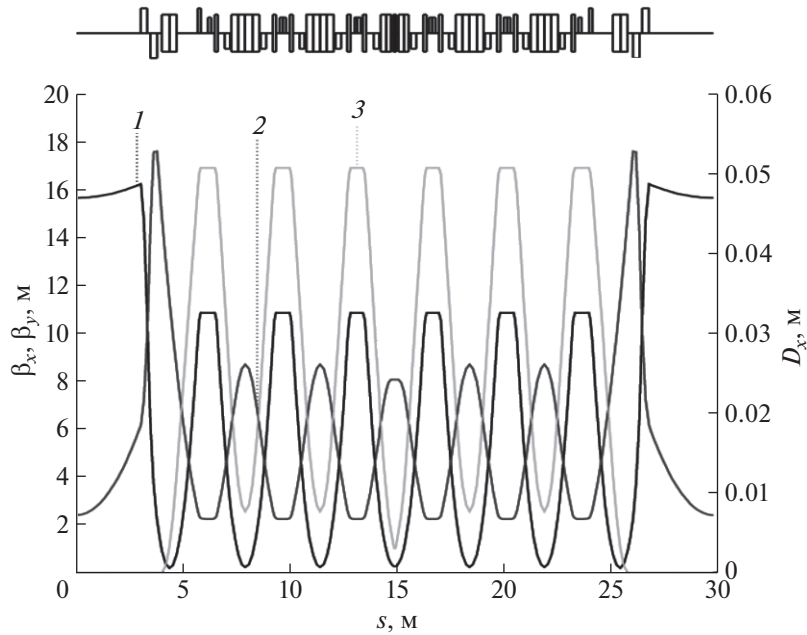


Рис. 4. Структура (вверху) и оптические функции суперпериода “СКИФ”: β_x (1), β_y (2), D_x (3).

числом структурных бетатронных резонансов. Оптические функции в прямолинейном промежутке (нулевая дисперсионная, большая горизонтальная β -функция и малая вертикальная) хорошо подходят для традиционной схемы инжекции в горизонтальной плоскости, размещения ускоряющих резонаторов и генераторов СИ, которые из-за малой вертикальной бетатронной функции слабо возмущают оптику кольца.

2.2. Основные аспекты динамики источника СИ “СКИФ”

Сильная фокусировка, необходимая для минимизации эмиттанса, приводит к большой хроматичности магнитной структуры, которую компенсируют мощные секступольные линзы, уменьшающие область устойчивого движения частиц по всем трем координатам (динамическую апертуру). Получение динамической апертуры, достаточной для достижения требуемого времени жизни (в условиях сильного внутрисгусткового рассеяния) и инжекции пучка, является одним из самых важных и сложных аспектов при проектировании источников СИ со сверхмалым эмиттансом. Линейный хроматизм структуры “СКИФ” компенсируют два семейства секступольных линз, размещенных только в базовых ячейках периодичности (рис. 5). Расчетные параметры секступольных линз приведены в табл. 2.

Для изучения динамической апертуры и выявления резонансных областей в окрестности рабочей точки бетатронных частот было проведено численное моделирование, результаты которого

показаны на рис. 6 [6]. При моделировании начальную вертикальную координату задавали малой, но не нулевой ($y_0 = 0.1$ мм), чтобы движение было двумерным. На рис. 6а отчетливо видны секступольные резонансы первого порядка приближения $\nu_{xc} = 3$ и $3\nu_{xc} = 10$, в окрестности которых горизонтальная апертура падает до нуля, а

Таблица 1. Основные параметры базовой структуры “СКИФ”

Энергия пучка, ГэВ	3
Симметрия	16
Периметр, м	476.14
Период обращения, мкс	1.588
Горизонтальный эмиттанс, пкм·град	73.2
Энергетический разброс	1×10^{-3}
Потери на оборот, кэВ	536
Коэффициент уплотнения орбит	7.64×10^{-5}
Натуральный хроматизм (x/y)	-149/-55
Гармоника ВЧ-резонатора	567
Частота ВЧ, МГц	357
Напряжение ВЧ, МВ	0.77
Энергетический акцептанс, %	2.6
Синхротронная частота	1.13×10^{-3}
Длина сгустка, мм	5.3
Радиационные числа (x/e)	1.94/1.06
Время затухания (x/e), мс	9.2/16.7

Примечание. Индексы x и e относятся к горизонтальному и энергетическому разбросу в сгустке.

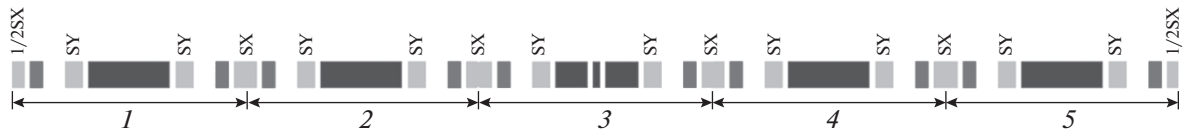


Рис. 5. Схема размещения хроматических секступольных линз.

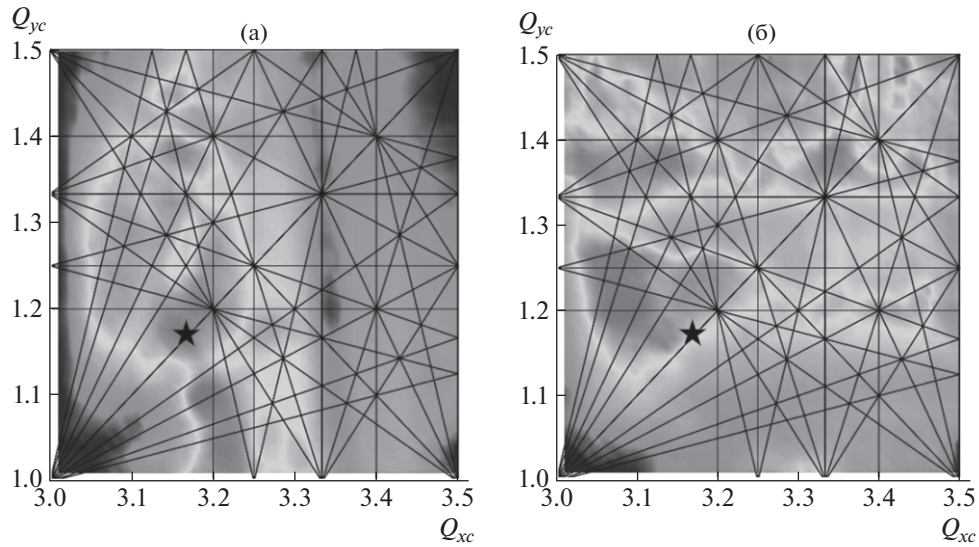


Рис. 6. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) динамическая апертура в зависимости от бетатронных частот одного суперпериода. Звездой отмечена рабочая точка. Динамическая апертура вычисляется в центре прямолинейного промежутка, где $\beta_x = 15.6$ м, $\beta_y = 2.4$ м.

также резонансы более высоких порядков, уменьшающие апертуру. Поскольку для источника СИ четвертого поколения вертикальный эмиттанс ограничен дифракционными эффектами на уровне $\epsilon_y \sim 10$ пкм·рад (для длины волны излучения $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$) и нет смысла добиваться очень малых значений коэффициента бетатронной связи ($\kappa \approx 5\text{--}10\%$ представляется достаточным), выбор рабочей точки вблизи разностного резонанса $\nu_{xc} - \nu_{yc} = 2$ выглядит допустимым и даже может быть полезным для получения круглых пучков.

Интересно проследить, как меняется горизонтальный эмиттанс в процессе сканирования, со-

ответствующие результаты приведены на рис. 7. Хорошо виден характерный минимум в районе $\nu_{xc} \approx 3.3$, при уменьшении или увеличении горизонтальной фокусировки эмиттанс растет. Как и предсказывает теория, от вертикальной бетатронной частоты эмиттанс не зависит.

Другим важным аспектом динамики пучка для накопителей с малым эмиттансом является эффект внутрисгусткового рассеяния (intra-beam scattering – IBS) электронов друг на друге, которое, как правило, определяет и время жизни, и фазовый объем пучка для источников СИ четвертого поколения. Противодействовать этому эффекту можно, оптимизируя магнитную структуру – используя вигглеры (увеличивая силу трения излучения), уменьшающие времена затухания бетатронных и синхротронных колебаний, или удлиняя густок путем постановки резонатора третьей гармоники, который деформирует потенциал синхротронного движения.

В табл. 3 приведены параметры пучка “СКИФ” с учетом внутрисгусткового рассеяния. Показаны результаты расчетов для бетатронной связи 10 и 100%. Использован либо один ускоряющий резонатор основной гармоники, настроенный, чтобы обеспечить энергетический акцеп-

Таблица 2. Основные параметры хроматических секступолей “СКИФ”

	l , м	$B''_{\text{ном}}$, Тл/м ²	$(K_2 l)_{\text{ном}}$, м ⁻²	B''_{max} , Тл/м ²	$(K_2 l)_{\text{max}}$, м ⁻²
SY	0.25	-2379	-59.48	-2800	-70
SX	0.30	2313	69.39	2800	84
1/2SX	0.15	2313	34.70	2800	42

Примечание. K_2 – величина квадрупольной компоненты в разложении магнитных полей.

танс $(\Delta E/E)_{\max} = \pm 3\%$ (случай обозначен как RF1), либо пучок, удлиняющийся примерно в 3 раза за счет дополнительной ВЧ-системы (RF1+3). Время жизни пучка “по Тушеку” τ_{TIBS} учитывает увеличение объема сгустка из-за многократного внутрисгусткового рассеяния.

В худшем случае при 10%-ной связи и без удлинения сгустка для тока 400 мА “тушековское” время жизни слегка больше 3 ч. Трехкратное удлинение более чем вдвое увеличивает время жизни. Внутрисгустковое рассеяние существенно увеличивает эмиттанс пучка. Так, при 10%-ной связи и естественной длине сгустка около 5 мм горизонтальный эмиттанс становится больше 110 пкм·рад. Удлинение электронного сгустка в 3 раза резонатором третьей гармоники и введение большой бетатронной связи существенно уменьшают эмиттанс пучка и увеличивают время жизни при номинальном токе 400 мА. Дополнительно уменьшить эмиттанс и увеличить время жизни можно с помощью постановки сверхпроводящих вигглеров, которые вносят сильное радиационное затухание.

Магнитные элементы на кольце неизбежно смещены относительно проектного положения. Точность позиционирования элементов определяется их конструкцией, погрешностями изготовления, техническими возможностями системы позиционирования. Моделирование движения частиц в накопителе “СКИФ” с учетом неточностей позиционирования, а также изучение и использование опыта современных источников СИ приводят к требованиям к допуску позиционирования магнитных элементов, представленным в табл. 4. Предполагается стандартная на сегодня схема размещения нескольких магнитных элементов на длинных (4–5 м) прецизионных подставках (“гирдерах” – girder), поскольку коррелированное перемещение магнитов существенно уменьшает искажение замкнутой орбиты. Значения в таблице представляют собой среднеквадратичные отклонения от проектного положения. В последнем столбце таблицы приведены допуски на поворот магнитов вокруг продольной оси (оси пучка).

Для измерения замкнутой орбиты в “СКИФ” имеются 224 датчика положения пучка. Для коррекции замкнутой орбиты предусмотрены дипольные корректоры, большая часть которых реализована в виде обмоток питания на полюсах секступольных линз. Каждая из 256 секступольных линз несет кроме основных секступольных катушек дополнительные, относительно слабые катушки коррекции, включая дипольную компоненту (вертикальную и горизонтальную), создающую поле до 100 Гс и градиентную компоненту (нормальную и скью (skew)) с максимальным значением градиента до 100 Гс/см.

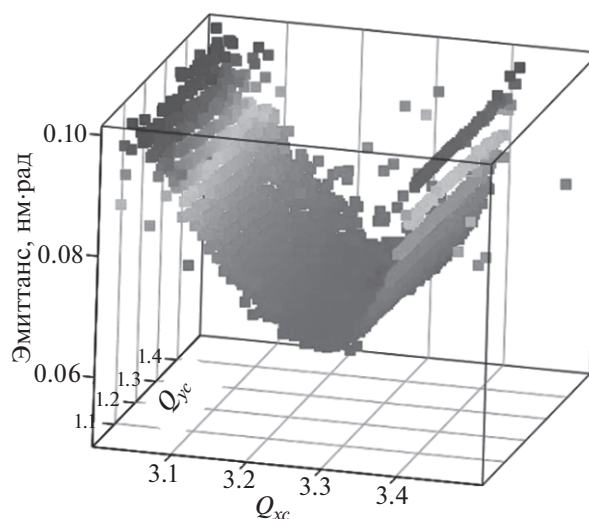


Рис. 7. Изменение горизонтального эмиттанса накопителя в зависимости от выбранной рабочей точки частот.

Дополнительно в каждом суперпериоде размещены два отдельно стоящих дипольных корректирующих магнита. Каждый из них при магнитной длине 5 см создает дипольную компоненту с индукцией до 400 Гс, а также скью-квадруполь с градиентом до 200 Гс/см. Таким образом, в накопительном кольце есть 320 дипольных корректоров по горизонтали и столько же по вертикали, 288 скью-квадрупольных и 256 квадрупольных корректоров.

Для моделирования искажения и коррекции замкнутой орбиты в накопителе ошибки позиционирования магнитных элементов (табл. 4) задавали в структуре кольца случайным образом согласно распределению Гаусса (24 выборки), ограниченному на уровне $\pm 2\sigma$ во избежание нереально больших искажений. Искаженную за-

Таблица 3. Параметры пучка при разных параметрах поперечной связи (500 сгустков, 400 мА, потери/оборот 0.531 МэВ, $V_{\text{RF}} = 0.845$ МВ, $(\Delta E/E)_{\max} = \pm 3\%$)

	10%		100%	
	RF1	RF1+3	RF1	RF1+3
ϵ_{x0} , пкм·рад	72.7			
$\epsilon_{\text{xcoupled}}$, пкм·рад	66		36	
ϵ_{xIBS} , пкм·рад	113	90	59	47
ϵ_{yIBS} , пкм·рад	11	9	59	47
$\sigma_{E/E} \times 10^4$ (0/IBS)	10.3/12.4	10.3/11.4	10.3/11.4	10.3/10.9
σ_r , мм (0/IBS)	5.3/5.9	15.8/16.2	5.3/5.4	15.8/15.4
τ_{TIBS} , ч	3.2	7.9	6.2	17

Таблица 4. Требования к позиционированию магнитных элементов основного кольца

	σ_x , мкм	σ_y , мкм	σ_s , мкм	σ_ψ , мкрад
Гирдеры	80	80	150	200
Элементы на гирдере	30	30	150	200

Таблица 5. Поля в корректорах для исправления искажения орбиты

Коррекция в секступолях		Отдельные корректоры
$G_{skew-max}$, Гс/см	60	—
$G_{norm-max}$, Гс/см	30	—
$B_{hor-max}$, Гс	60	300
$B_{ver-max}$, Гс	55	280

Примечание. Здесь и далее G – градиент магнитного поля в квадрупольной линзе.

Таблица 6. Параметры кольца “СКИФ” после коррекции замкнутой орбиты

Остаточное среднеквадратичное искажение орбиты по x , мкм	80
Остаточное среднеквадратичное искажение орбиты по y , мкм	98
Горизонтальный эмиттанс, пкм·рад	74 ± 2
Коэффициент связи бетатронных колебаний, %	0.1
Остаточные биения β -функций, %	1

Таблица 7. Параметры линейного ускорителя инжектора “СКИФ”

Энергия электронов, МэВ	200
Максимальная энергия, МэВ	210
Частота выстрелов, Гц	1
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ, нм·рад	150
Разброс по энергии при 200 МэВ, %	≤ 1

мкнутую орбиту исправляли в три этапа. Вначале корректировали собственно орбиту при помощи программы MAD-X [7]. Затем исправляли отклонение оптических функций от расчетных с помощью градиентных корректирующих обмоток и, наконец, с помощью квадрупольными корректирующими катушками компенсировали линейную связь бетатронных колебаний.

В табл. 5 приведены амплитудные значения полей корректоров, которые понадобились для удовлетворительной коррекции орбиты, оптики и бетатронной связи. Эти значения приблизи-

тельно в 2 раза меньше проектных, приведенных выше. Следовательно, система коррекции обладает необходимым запасом сил корректоров.

В табл. 6 даны основные параметры оптической системы накопителя “СКИФ” после искажения замкнутой орбиты, вызванного погрешностями позиционирования магнитных элементов, и последующей коррекции орбиты и параметров оптики. Остаточная среднеквадратичная погрешность орбиты по показаниям датчиков положения пучка не превышает 100 мкм, что приводит к “биению” бетатронных функций на уровне 1% и значению горизонтального эмиттанса 74 ± 2 пкм·рад. Связь бетатронных колебаний удается компенсировать до значения 10^{-3} (отношение вертикального эмиттанса к горизонтальному).

2.3. Основные технические системы источника СИ “СКИФ”

2.3.1. Система инжекции. Инжекция электронов в источник СИ “СКИФ” (top-up injection) осуществляется при энергии 3 ГэВ с частотой, задаваемой током и временем жизни пучка в основном накопителе. Инжекционный комплекс состоит из линейного ускорителя с максимальной энергией 200 МэВ, бустерного синхротрона и каналов транспортировки пучков. В основном режиме работы источник СИ “СКИФ” заполняется приблизительно 500 сгустками электронов (частота ВЧ-резонаторов бустера и накопителя 357 МГц) с полным током 400 мА. Максимальная частота повторения циклов инжекции – 1 Гц. Для экспериментов с временным разрешением могут быть использованы специальные режимы с одним или несколькими сгустками, распределенными требуемым образом вдоль орбиты. В основном режиме накопителя инжекция осуществляется цугами по 55 сгустков с зарядом ~ 0.3 нКл в каждом, в специальных режимах управление модулятором пушки позволяет получить в цуге один или несколько (в пределах огибающей 310 нс) сгустков. В последнем случае для уменьшения времени заполнения кольца интенсивность сгустка может быть увеличена до ~ 1 нКл. Параметры линейного ускорителя приведены в табл. 7.

Линак состоит из трех основных частей (рис. 8): источника электронов, систем группировки и предускорения и регулярных ускоряющих структур. В каждой части имеются элементы, обеспечивающие фокусировку и диагностику пучка, необходимые вакуумные условия.

К основным компонентам линейного ускорителя относятся следующие подсистемы: источник электронов – СВЧ-пушка с рабочей частотой 178.5 МГц; резонатор группировки пучка с частотой 535.5 МГц (третья гармоника рабочей частоты СВЧ-пушки); предускоритель-группирова-

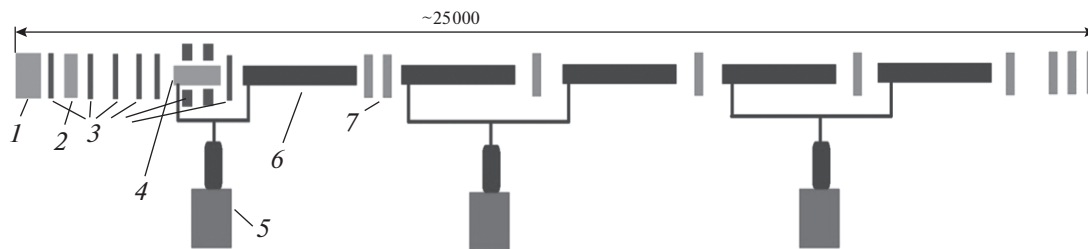


Рис. 8. Схема линейного ускорителя инжектора “СКИФ”: 1 – ВЧ-пушка 178 МГц; 2 – группирователь третьей гармоники 534 МГц; 3 – соленоиды; 4 – предускоритель-группирователь; 5 – клистрон 2856 МГц, 50 МВт; 6 – регулярная ускоряющая секция 2856 МГц; 7 – квадрупольный дублет.

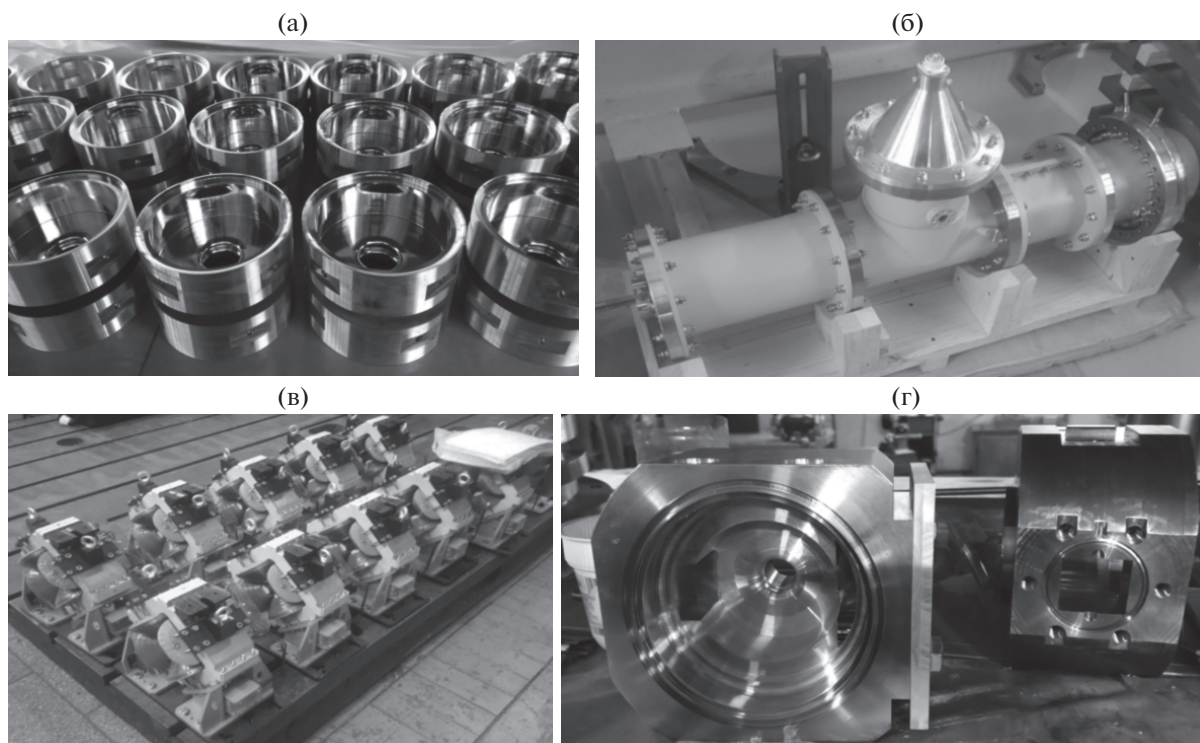


Рис. 9. Изготовленные в ИЯФ СО РАН компоненты линака “СКИФ” (март 2022 г.): а – секции основной ускоряющей структуры, б – катодный узел электронной СВЧ-пушки, в – фокусирующие квадрупольные линзы линака и канала перепуска, г – анодный фланец СВЧ-пушки.

тель, представляющий собой структуру на бегущей волне ($2\pi/3$) с частотой 2856 МГц; основная ускоряющая структура (пять секций длиной 3 м каждая) на бегущей волне ($2\pi/3$) с частотой 2856 МГц; источники СВЧ-питания – пушки с выходной мощностью примерно 1 МВт, резонатор группировки пучка мощностью 10 кВт – три клистрона, питающие предускоритель-группирователь и пять секций основной ускоряющей структуры. Параметры клистрона: частота – 2856 МГц, номинальная мощность – 50 МВт. На рис. 9 показано изготовление элементов линейного ускорителя.

Бустерный синхротрон предназначен для ускорения пучка электронов из линейного уско-

рителя с энергией 200 МэВ до проектной энергии основного кольца 3 ГэВ. Основные фазы работы бустера: инжекция цуга электронных сгустков, выпущенных из линейного ускорителя, их ускорение до рабочей энергии накопителя с минимальными потерями и выпуск пучка в транспортный канал с параметрами, позволяющими осуществлять инжекцию в основное кольцо с эффективностью, близкой к единице. Горизонтальный эмиттанс и энергетический разброс инжектируемого из линака пучка $\epsilon_{xi} = 4\sigma_{xi}\sigma'_{xi} = 1.5 \times 10^{-7}$ м рад и $(\sigma_E/E)_i < 10^{-2}$ соответственно. Магнитная структура синхротрона включает в себя четыре квадранта-суперпериода, каждый из

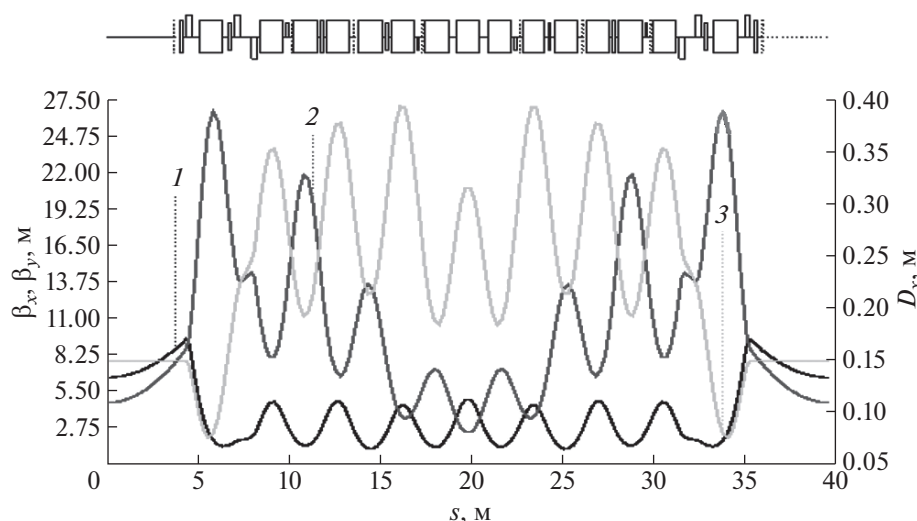


Рис. 10. Структура (вверху) и оптические функции квадранта синхротрона: β_x (1), β_y (2), D_x (3).

которых состоит из пяти стандартных и двух модифицированных ячеек для подавления дисперсии. Квадрант содержит следующие магнитные элементы: восемь дефокусирующих дипольных магнитов с углом поворота 8.39° ; семь фокусирующих магнитов с углом поворота 3.27° (оба диполя представляют собой Н-образные изогнутые магниты с параллельными полюсами, для ком-

пенсации хроматизма в них введена секступольная компонента поля); шесть квадрупольных магнитов для настройки бетатронных частот; четыре секступольных магнита для удобства компенсации хроматизма. Графики структурных функций одного суперпериода представлены на рис. 10. Основные параметры приведены в табл. 8.

Стандартный цикл работы бустера, соответствующий частоте 1 Гц, показан на рис. 11. Цикл включает в себя однократный выпуск пучка (состоящего из одного или нескольких сгустков), ускорение, выпуск в основное кольцо, перемагничивание до энергии инжекции, которое совмещается с размагничиванием корректоров. После накопления требуемой интенсивности пучка в основном кольце бустер перестает циклировать и остается в режиме пучка из линака. На рис. 12 представлено изготовление элементов бустерного синхротрона “СКИФ”.

2.3.2. Магнитная система накопителя “СКИФ”.

Характерными чертами магнитной системы источника СИ четвертого поколения являются большие градиенты квадрупольных и секступольных линз, использование магнитов с совмещенными функциями (например, наличие градиента в дипольном магните), плотная “упаковка” магнитных элементов в продольном направлении. Большие градиенты приводят к малым апертурам, а поскольку требования к качеству магнитного поля высоки, соответственно, увеличивается точность изготовления магнитов и их взаимного позиционирования. Основные характеристики магнитов “СКИФ” представлены в табл. 9.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН начато изготовление первых магнитных элементов накопителя электронов ЦКП “СКИФ”. На рис. 13 показаны трехмерные модели магнитов.

Таблица 8. Основные параметры бустерного синхротрона при энергии инжекции и выпуска пучка

Энергия, ГэВ	0.2	3
Длина окружности, м	158.71	
Максимальный ток, мА		
Период обращения, нс	529	
Натуральный хроматизм ξ_x/ξ_y	-9.5/-13.5	
Коэффициент уплотнения орбит α	8.81×10^3	
Частота ВЧ-системы, МГц	357	
Номер ВЧ-гармоники	189	
Амплитуда ускоряющего напряжения, МВ	0.2	1.2
Синхротронная частота, кГц	30.75	20.9
Энергетический ВЧ-акцептанс ϵ_{RF} , %	1.96	0.54
Горизонтальный эмиттанс ϵ_x , нм·рад	0.166	37.4
Разброс энергии $\sigma_E/E \times 10^4$	0.55	8.31
Продольный размер пучка, мм	0.76	19.8
Потери энергии за оборот U_0 , кэВ	0.0135	685.8
Времена затухания τ_x/τ_s , мс	$15.6/7.8 \times 10^3$	4.62/2.32

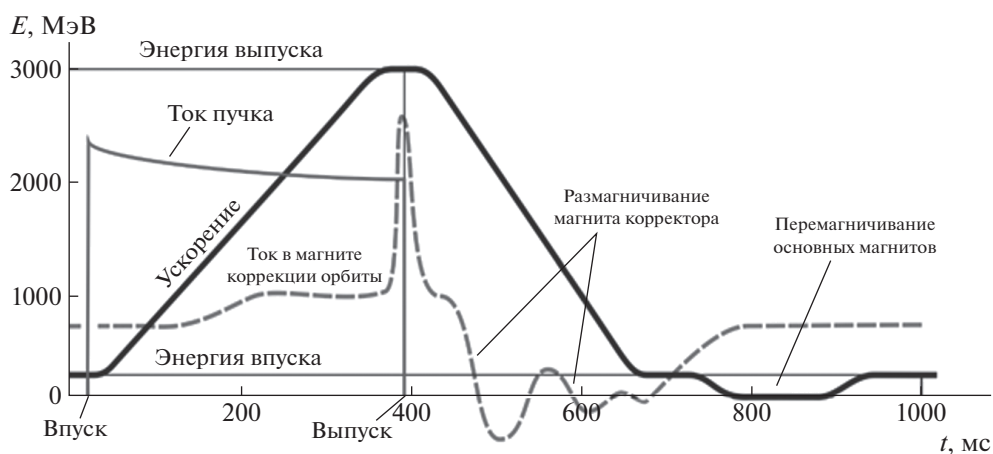


Рис. 11. Временной цикл работы синхротрона-бустера “СКИФ”.

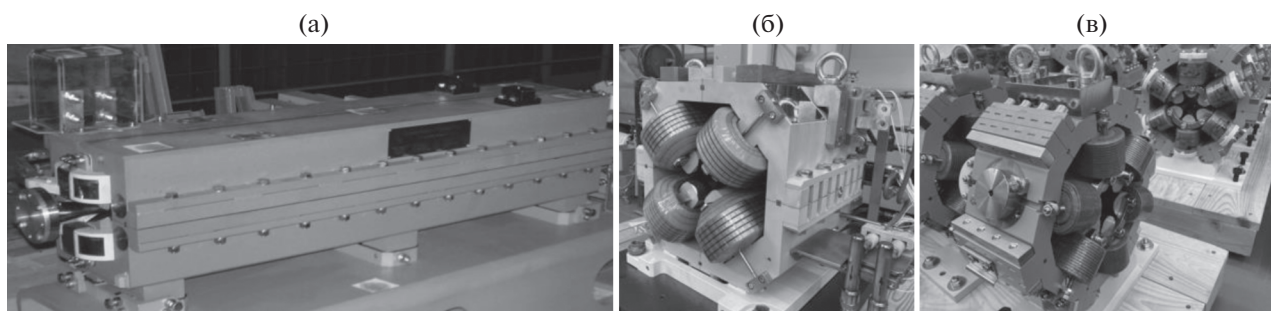


Рис. 12. Изготовленные дипольный (а), квадрупольный (б) и секступольный (в) магниты синхротрона-бустера “СКИФ”.

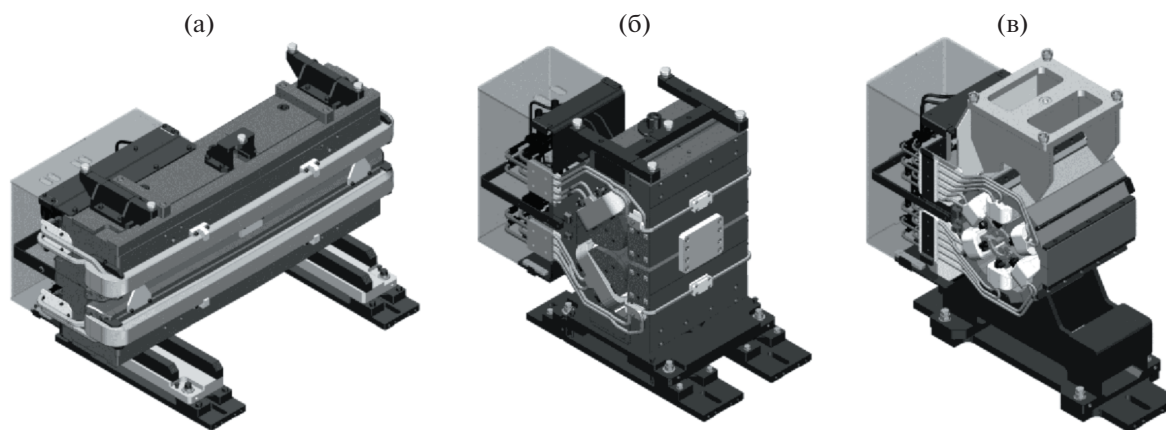


Рис. 13. Трехмерные модели основных магнитов накопителя “СКИФ”: дипольного магнита с градиентом (а), квадрупольной (б) и секступольной (в) линз.

2.3.3. Вакуумная система накопителя “СКИФ”.

Расчеты показывают, что для обеспечения “вакуумного” времени жизни пучка 10 ч в накопителе “СКИФ” среднее давление остаточных газов (в эквиваленте СО) должно быть не более 2.5 нторр (3.3×10^{-7} Па).

В связи с развитием и широким распространением в последнее время малогабаритных комбинированных вакуумных насосов (ионно-геттерный + геттерный) [8] и методов нанесения нераспыляемых геттеров внутри малоапертурных камер [9–14] в накопителе “СКИФ” принята ги-

Таблица 9. Основные параметры магнитных элементов накопителя для базовой структуры

Тип/число	L , м	θ , град	ρ , м	B , Тл	G , Тл/м	S , Тл/м ²
Дипольные магниты						
BD1/64	1.3	4.12	18.07	0.553	-7.91	
BD2/32	0.47	1.245	21.62	0.526	-10.74	
BM/32	0.69	2.079	19.01	0.526		
BP/16	0.148	1.74	4.87	2.05		
Квадрупольные магниты						
QD/32	0.3				-44.56	
QF1/32	0.3				43.97	
QF2/32	0.15				48.66	
QF3/128	0.15	-0.221	-38.84	-0.257	51.52	
QF4/32	0.15	-0.3	-28.66	-0.349	49.87	
Секступольные магниты						
SF1/32	0.15					2313.09
SD/160	0.25					-2379.39
SF2/64	0.3					2313.09

бридная система вакуумной откачки: сосредоточенные комбинированные насосы в арках и распределенные насосы на основе геттерных пленок системы TiZrV в прямолинейных промежутках. Геттерные пленки будут также применяться во вставных устройствах, работающих при комнатной температуре. Во вставных устройствах со сверхпроводящими магнитными элементами вакуумная камера пучка автоматически будет играть роль эффективного распределенного криогенного насоса. Комбинированные насосы расположены в среднем на расстоянии 1 м друг от друга. Быстрота откачки насоса по СО не менее 120 л/с.

Особое внимание уделяют подбору материалов для изготовления вакуумных элементов, конструкциям откачных портов и соединительных элементов для минимизации резистивных и гео-

метрических импедансов. Ступеньки и щели во фланцевых соединениях и сильфонных узлах вакуумных камер вследствие их большого количества могут быть значительными источниками импедансов. В накопителе “СКИФ” применяются алюминиевые вакуумные камеры. Фланцы камер также сделаны из алюминиевого сплава.

На рис. 14 показана вакуумная камера со стандартным откачным портом. Фланцы DN63 откачного порта имеют стандарт ConFlat, но выполнены из алюминиевого сплава. Фланцы имеют стандартный нержавеющий крепеж и титановое кольцо, компенсирующее тепловое удлинение камеры. Данная вакуумная камера проходит через квадрупольный и секступольный магниты. К откачным портам подключается вакуумное оборудование: насосы, вакуумметры или анализаторы остаточных газов.

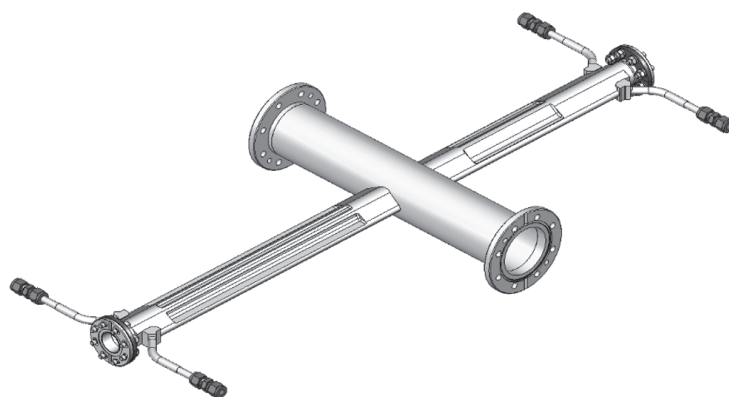


Рис. 14. Вакуумная камера со стандартным откачным портом.

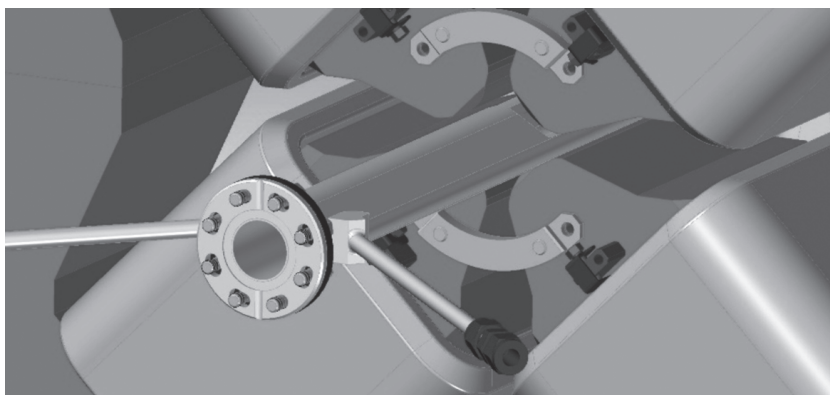


Рис. 15. Трехмерная модель вакуумной камеры в квадрупольном магните.

Камера выполнена из алюминиевого профиля, полученного методом экструзии. Она имеет два канала в горизонтальной плоскости. Один канал используется для водяного охлаждения, второй может быть применен для прокладки нагревающего кабеля. Трехмерная модель вакуумной камеры, вставленной в квадрупольную линзу, с фланцевым соединением и патрубками водяного охлаждения показана на рис. 15.

2.3.4. Ускоряющие резонаторы ЦКП “СКИФ”. Ускоряющие системы бустера и накопителя “СКИФ” работают на одной и той же частоте 357 МГц. Основные компоненты системы (высокочастотные ускоряющие резонаторы с подавлением высших мод и твердотельные ВЧ-генераторы) унифицированы для обеих установок. Количество резонаторов в бустере – 3 шт., в накопителе – 5 шт.

При энергии выпуска резонаторы бустера должны обеспечить ускоряющее напряжение 1.2 МВ. Мощность радиационных потерь при энергии выпуска и среднем токе пучка 30 мА составляет 20.6 кВт. Резонаторы накопителя должны обеспечить ускоряющее напряжение 1.8 МВ. Мощность радиационных потерь при энергии выпуска и среднем токе пучка 400 мА составляет 430 кВт.

Конструкция ВЧ-резонатора имеет форму цилиндра, ось которого совпадает с направлением движения частиц. К барельной части резонатора крепятся три волноводных перехода, запердельных для основной гармоники, на конце которых располагаются СВЧ-поглотители для демпфирования высших мод, возбуждаемых в резонаторах пролетающими сгустками электронов, а также канал ввода ВЧ-мощности, узел перестройки частоты и вакуумный насос. Внутренняя геометрия резонатора оптимизирована для того, чтобы, с одной стороны, максимально обеднить спектр высших мод, а с другой – обеспечить приемлемые

параметры на основной моде. В получившейся геометрии спектр высших мод существенно прорежен, но шунтовое сопротивление основной моды осталось достаточно высоким – 2.55 МОм. Максимальная плотность мощности при напряжении 400 кВ составит 15.7 Вт/см². Трехмерная модель резонатора представлена на рис. 16. Параметры резонатора перечислены в табл. 10.

3. УСТРОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ И ФРОНТЕНДЫ ДЛЯ ВЫВОДА СИ

3.1. Устройства генерации излучений

Для размещения многополюсных устройств генерации излучений (ондуляторов или вигглеров) в ЦКП “СКИФ” имеются 14 промежутков длиной 6 м каждый. Кроме того, в каждом суперпериоде есть возможность вывода излучения из двух поворотных магнитов с полями около 0.5 и 2 Тл. Основные характеристики точек излучения представлены в табл. 11.

Экспериментальные станции первой очереди в качестве устройств генерации используют вигглеры и ондуляторы. Тип и параметры каждого устройства генерации определяются экспериментальными требованиями. Для станций 1-3 и 1-5 будут изготовлены сверхпроводящие вигглеры, параметры которых (для тока пучка 400 мА) указаны в табл. 12. Подобные вигглеры производства ИЯФ СО РАН применяют во многих центрах СИ [15, 16], их общий вид (в криостате) представлен на рис. 17.

Три станции первой очереди будут использовать излучение из сверхпроводящих ондуляторов двух типов, параметры которых представлены в табл. 13. Ондулятор с параметрами, близкими к требуемым, был разработан и создан в ИЯФ СО РАН для источника СИ Diamond (Великобритания). Набор полюсов такого ондулятора показан на рис. 18.

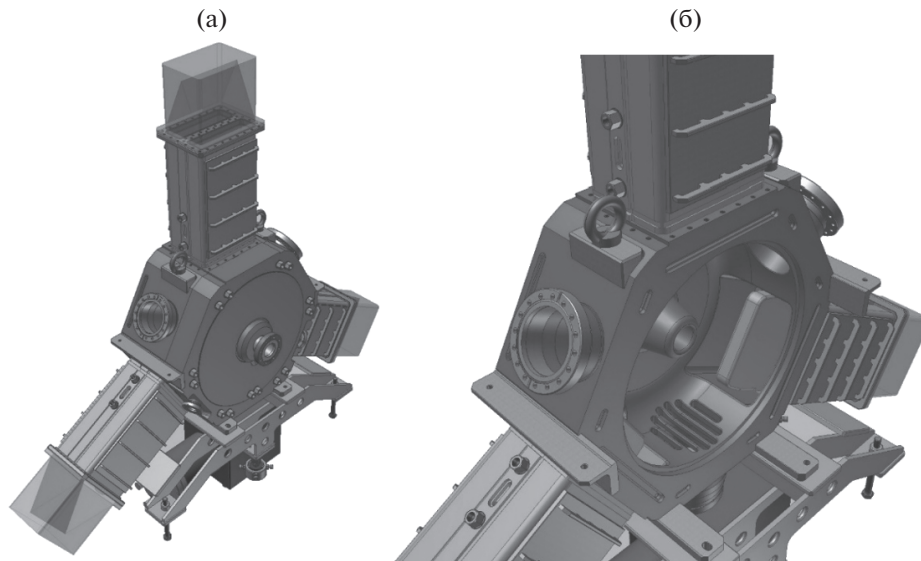


Рис. 16. 3D-модель резонатора: а – резонатор в сборе, б – без торцевой стенки.

Для станции 1-6 предполагается разработать специализированный электромагнитный ондулятор с эллиптической поляризацией, позволяющий получать фотоны с линейной, эллиптической и в ряде случаев циркулярной поляризацией в спектральных диапазонах мягкого рентгена и вакуумного ультрафиолета. Основные параметры ондулятора представлены в табл. 14. Графики яркости СИ в зависимости от энергии фотонов для разных устройств генерации представлены на рис. 19. Расчеты спектров проводили с помощью пакета SPECTRA [17].

3.2. Фронтенды и каналы вывода СИ для станций первой очереди

Фронтенды (переходная часть от вакуумной камеры накопителя к каналу вывода СИ) распо-

лагаются в ускорительном зале до стены биозащиты. Они содержат устройства коллимации, вакуумной защиты, приема и контроля положения прямого пучка СИ, транспортируемого из накопителя к экспериментальной станции. Система радиационных затворов и коллиматоров обеспечивает радиационные условия в экспериментальном помещении на безопасном уровне. От накопителя и канала вывода СИ фронтенд отсекается цельнометаллическими шиберами.

В настоящее время для станций первой очереди ведется разработка фронтендов, конструктивные решения которых определяются типом и характеристиками устройства генерации излучений. Шесть проектируемых фронтендов можно разделить на три группы: для сверхпроводящих вигглеров (станции 1-3 и 1-5); для сверхпрово-

Таблица 10. Параметры резонатора на основной моде

	Бустер*	Накопитель
Рабочая частота f_0 , МГц	357	
Диапазон перестройки частоты Δf , МГц	1	
Собственная добротность $0.7Q_0$ 3D model	17000	
Характеристическое пролетное сопротивление R/Q , Ом	150	
Шунтовое пролетное сопротивление R , МОм	2.55	
Амплитуда ускоряющего напряжения V_m , кВ	400	360
Мощность потерь в стенках P , кВт	31.4	26
Максимальная плотность мощности потерь p_{max} , Вт/см ²	15.7	13
Мощность, передаваемая пучку для компенсации радиационных потерь P_b , кВт	6.9	86

* В случае резонаторов бустера параметры приведены для энергии выпуска.

Таблица 11. Основные характеристики точек излучения

	Промежуток	Магнит 2 Тл	Магнит 0.5 Тл
Значения β -функций β_x/β_y , м	15.6/2.4	0.3/7.8	0.2/8.9
Дисперсионная функция D_x , мм	0	3	8
Индукция магнитного поля B , Тл		1.95–2.05	0.554
Критическая энергия фотонов, кэВ		11.9	3.3
Плотность мощности в плоскости орбиты, Вт/мрад		91.2	25.25
Размер источника горизонтальный/вертикальный, мкм	108.2/13.3	14.1/24.1	15.6/25.9

Таблица 12. Параметры вигглеров для станций первой очереди

	1-3	1-5
Период, мм	27	48
Максимальное вертикальное поле, Тл	2.7	4.5
Параметр K	6.8	20.2
Магнитная длина, м	1.84	0.86
Количество периодов	68	18
Апертура фиксированной маски (ширина \times высота), мрад	1.8 \times 0.11	2 \times 0.2
Критическая энергия фотонов, кэВ	16.16	26.93
Полная мощность излучения, кВт	30.7	39.8
Плотность мощности на оси, кВт/мрад ²	64.25	28.39
Угловая расходимость горизонтальная, мрад	3.6	4.9

Примечание. Здесь и далее параметр K – одна из характеристик многополюсных устройств генерации.

дящих ондуляторов с разделительными окнами (1-1 и 1-2); для мягкого ондуляторного излучения без разделительных окон (1-4 и 1-6).

Основными компонентами фронтендов являются: предохранительный магнит, который предотвращает возможность пролета первичных

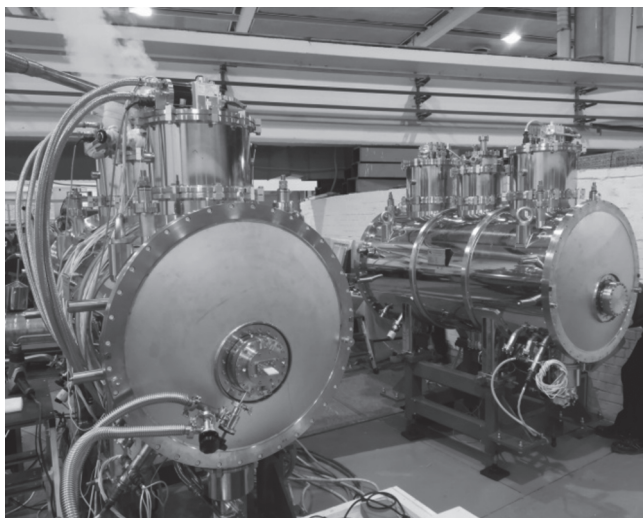
**Рис. 17.** Общий вид сверхпроводящих вигглеров, аналогичных разрабатываемым в проекте.

Таблица 13. Основные параметры сверхпроводящих ондуляторов для станций первой очереди

Станция	1-1 и 1-2	1-4
Период, мм	15.6	18
Максимальное вертикальное поле, Тл	1.25	1.5
Параметр K	1.8	2.5
Магнитная длина, м	1.99	1.96
Количество регулярных периодов	126	109
Межполюсный зазор, мм	7	7
Апертура фиксированной маски, мрад	0.2×0.2	0.2×0.2
Полная мощность излучения, кВт	6.99	10.05
Фундаментальная гармоника, кэВ	2.06	1.13
Плотность мощности на оси, кВт/мрад ²	53.96	56.59

электронов или электронно-позитронных ливней, образующихся в вакуумной камере накопителя или каналах вывода; пластинчатый датчик, измеряющий положение центра тяжести прохо-

Таблица 14. Основные параметры эллиптического ондулятора

Период, мм	212
Максимальное вертикальное поле, Тл	0.49
Максимальное горизонтальное поле, Тл	0.05
Параметр K	0.9–9
Магнитная длина, м	4.92
Количество регулярных периодов	20
Межполюсный зазор, мм	19
Апертура фиксированной маски, мрад	0.42×0.42

дящего пучка (основан на измерении фототока с пластин, поглощающих крайние боковые лучи); фиксированная маска для первичной коллимации выходящих пучков (выходные апертуры масок рассчитывают для каждого фронтенда индивидуально); регулируемая маска для точной настройки размеров пропускаемого пучка по вертикали и горизонтали; радиационный затвор, оперативно перекрывающий выходной канал, предотвращая выход излучения и ослабляя ливни до безопасного для персонала уровня; радиаци-

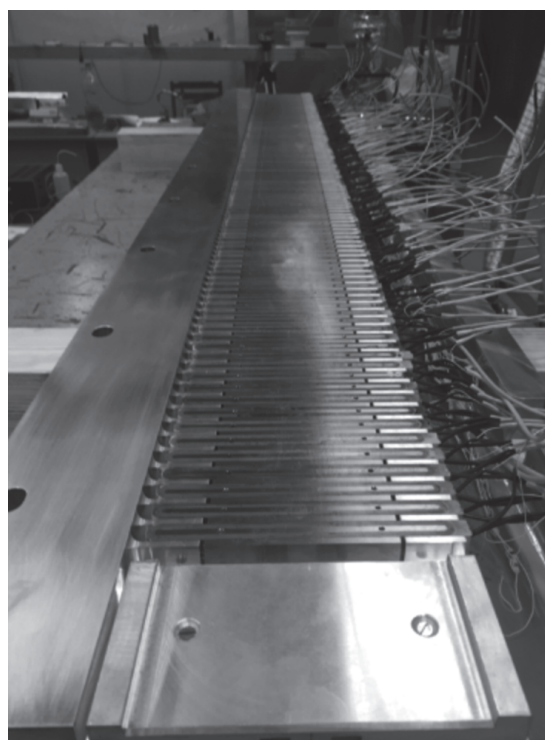


Рис. 18. Нижняя половина сверхпроводящего ондулятора до постановки в криостат.

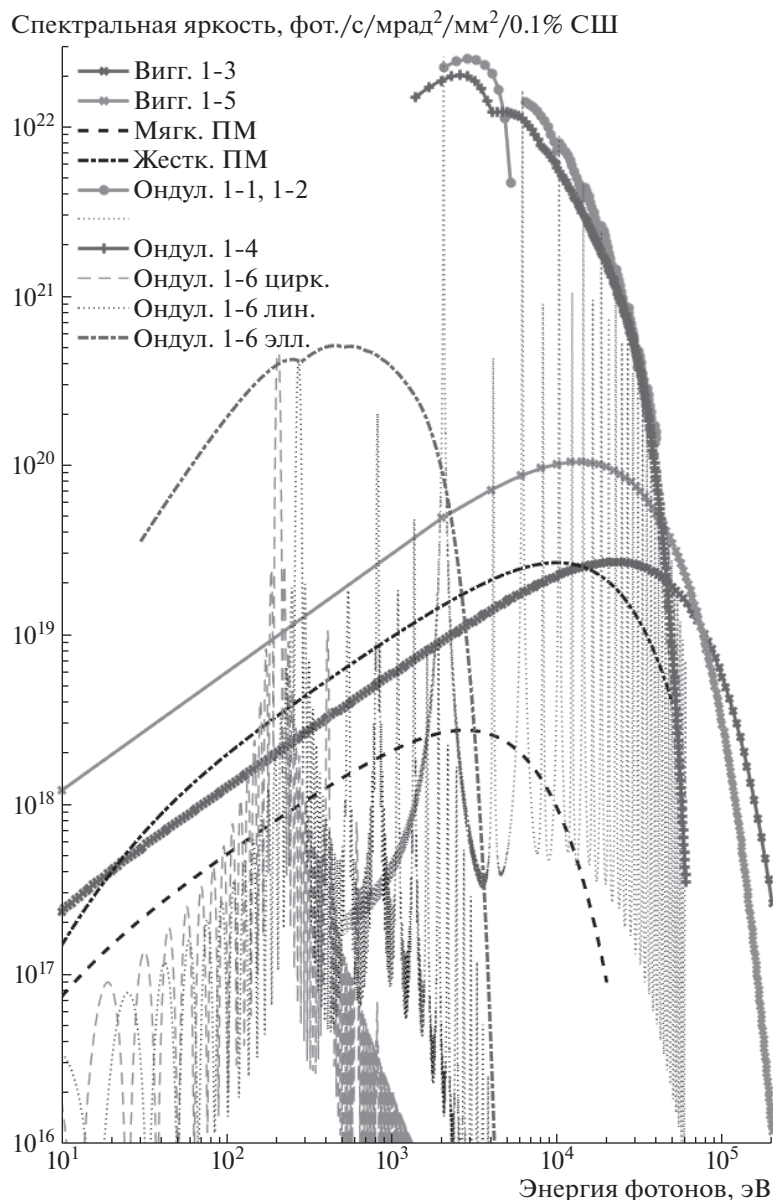


Рис. 19. Спектры основных устройств станций первой очереди, генерирующих излучение, и поворотных магнитов «СКИФ». Яркость представлена для относительной спектральной ширины (СШ) интервала $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 0.1\%$.

онный коллиматор для поглощения боковых лучей тормозных ливней.

Вакуумная система фронтендов включает в себя набор вакуумных клапанов и откачных портов с системами измерения давления. На незаконные и вигглерные фронтенды устанавливают системы быстрого перекрытия каналов для обеспечения вакуумной безопасности накопительного кольца в случае аварийного нарушения вакуума. Во фронтендах с алмазными охлаждаемыми окнами происходит разделение вакуумных объемов.

В состав каждого фронтенда включается система контроля и управления. Помимо оператив-

ного управления элементами фронтенда на нее возлагается контроль текущего состояния элементов, вакуума и температуры поглощающих элементов, а также выполнение сценариев остановки работ в случае возникновения аварийных ситуаций. Общий вид элементов фронтенда представлен на рис. 20.

4. ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ЦКП «СКИФ»

Как упоминалось выше, местом размещения ЦКП «СКИФ» выбран наукоград Кольцово, рас-

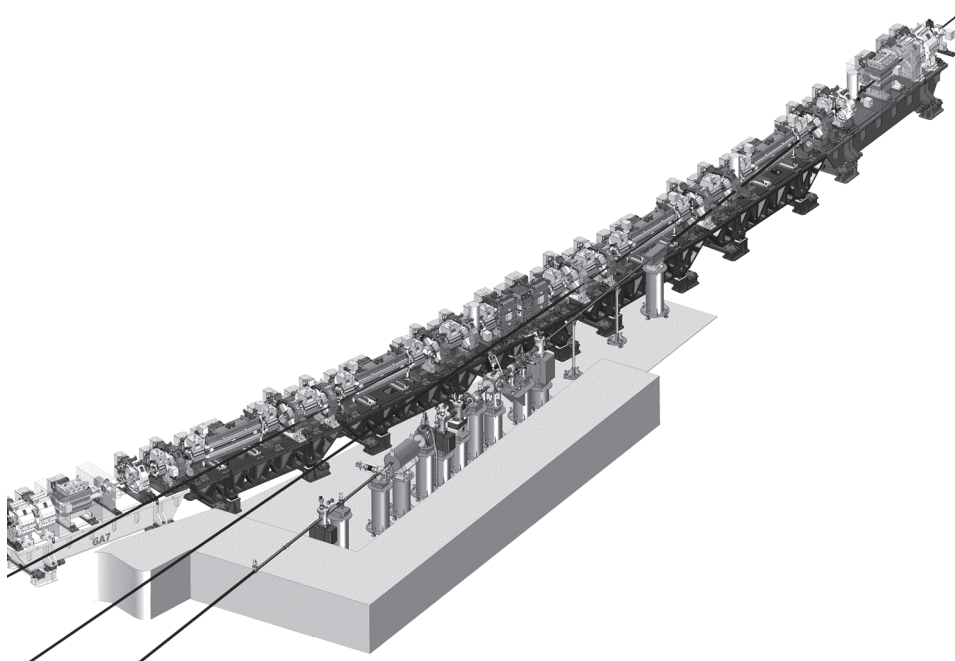


Рис. 20. Общий вид элементов фронтенда 1-1 в тоннеле основного кольца.

положенный в 10 км от Новосибирского Академгородка и в 20 км от центра Новосибирска. При выборе локации учитывали такие факторы, как геологическое строение участка, отсутствие крупных промышленных предприятий, которые могут стать источником микросейсмического фона, наличие требуемых свободных энергоресурсов, близость научных центров и другие факторы. В Кольцово находятся Биотехнопарк Новосибирской области, ГНЦ вирусологии и биотехнологии “Вектор”, другие организации, работающие в сфере микробиологии, биохимии и медицины, заинтересованные в проведении исследований в ЦКП “СКИФ”.

Таблица 15. Основные строительные характеристики ЦКП “СКИФ”

Наименование показателя	Единица измерения
Общая площадь участка, м ²	298 222.0
Площадь застройки, м ²	66 294.9
Площадь покрытий (проезды, площадки, тротуары), м ²	88 245.6
Площадь озеленения, м ²	134 248
Плотность застройки, %	22.2

В состав инженерного комплекса ЦКП “СКИФ” входят 34 здания и сооружения. Схема их размещения на площадке приведена на рис. 21. Общий архитектурный вид ЦКП “СКИФ” показан на рис. 22. Основные строительные характеристики комплекса представлены в табл. 15, а оценки объема потребляемых ресурсов – в табл. 16.

При работе современных источников СИ жесткие требования предъявляют к стабильности параметров самых разных систем, включая термостабилизацию деионизированной воды для охлаждения магнитных элементов и приемников излучения, воздуха в помещениях, где располо-

Таблица 16. Основные энергетические потребности ЦКП “СКИФ”

Ресурс	Показатель
Электроснабжение, МВт	12.447
Теплоснабжение, Гкал/ч	6.839
Водоснабжение с учетом приготовления горячей воды, м ³ /ч	44.86
Водоотведение (бытовая канализация), м ³ /ч	40.06
Водоотведение (ливневая канализация), м ³ /ч	504
Интернет, Гбит/с	3

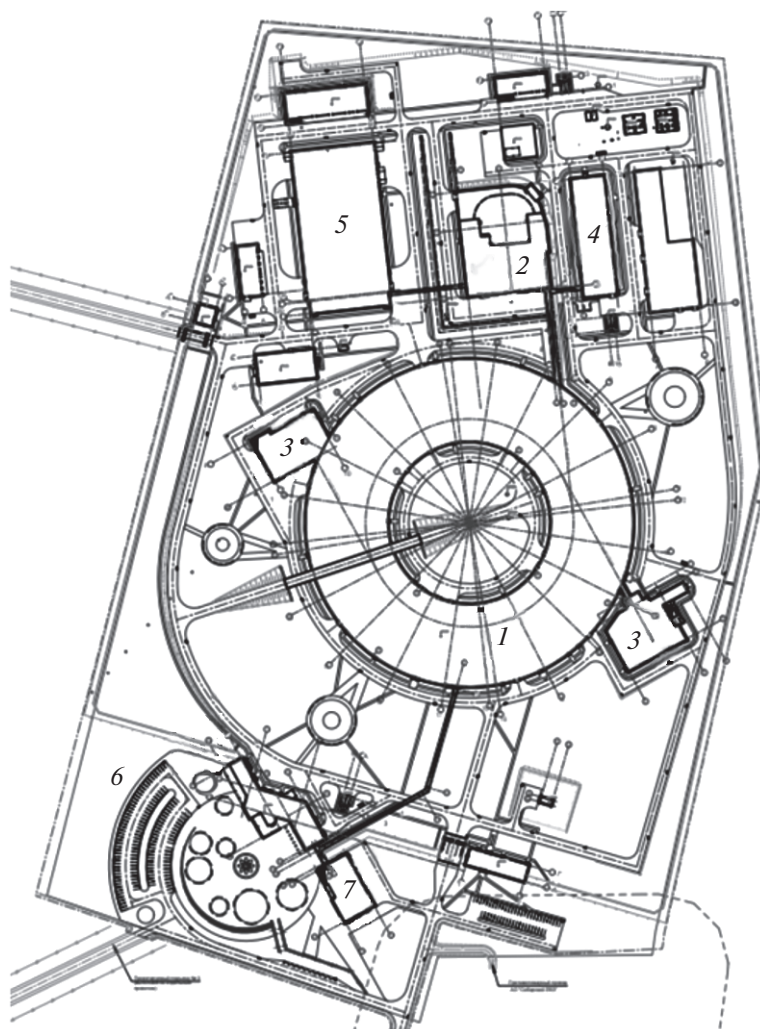


Рис. 21. Схема размещения зданий и сооружений ЦКП “СКИФ”: 1 – накопитель, 2 – инжектор, 3 – вынесенные экспериментальные станции, 4 – лабораторный корпус, 5 – корпус стендов и испытаний, 6 – административный корпус, 7 – столовая.

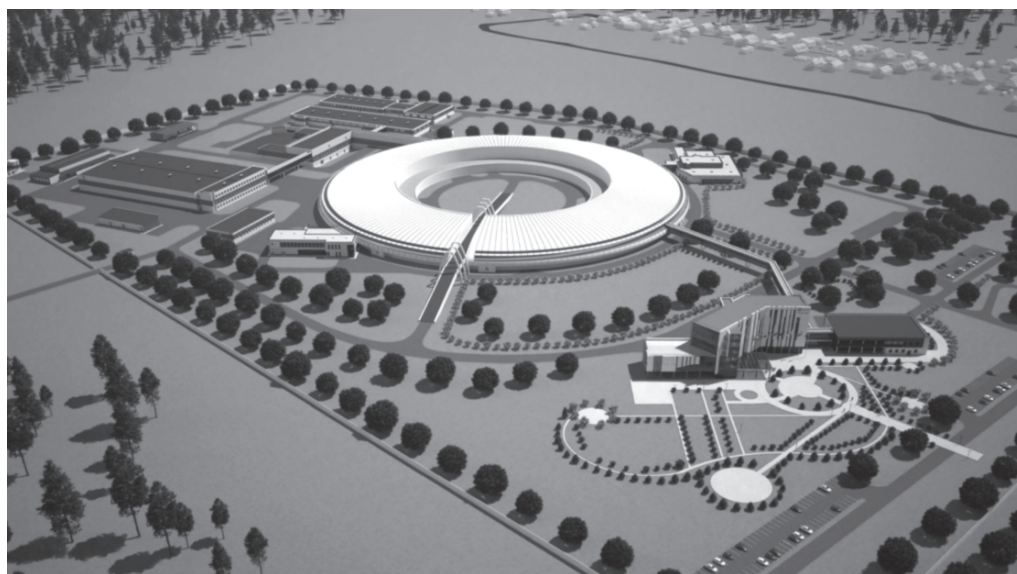


Рис. 22. Общий вид ЦКП “СКИФ”. На переднем плане административный корпус и столовая.

Таблица 17. Технологические требования к инженерным системам ЦКП “СКИФ”

Помещения с технологическим оборудованием	Температурный допуск (вода), °С	Температурный допуск (воздух), °С	Допуск колебаний магнитов, нм	
			2–10 Гц	10–100 Гц
Тоннель накопителя	±0.1	±0.1 (1 ч)	≤50	≤20
Экспериментальный зал	±1	±1	н/о	≤30
Каналы перепуска	±1	±1		≤150
Тоннель бустера	±1	±1		≤150
Линак	±1	±1		≤150

жены элементы ускорителя, станций, электроники, уменьшение влияния электрических наводок и т.д. Особое внимание уделяют поперечной стабилизации магнитов накопителя из-за микросейсмических шумов природного или техногенного характера, поскольку вибрации магнитов приводят к увеличению эффективного эмиттанса пучка и ухудшению характеристик источника СИ. Технологические требования, предъявляемые к инженерным системам ускорительного комплекса и экспериментальных станций, приведены в табл. 17.

Предварительно отобранная строительная площадка комплекса была изучена на предмет природных и техногенных сейсмических шумов, включая землетрясения, взрывные работы карьеров и месторождений в радиусе до 500 км, желез-

нодорожный и автотранспорт и другие шумы. Для наглядности на рис. 23 показана велосигрма микросейсмических колебаний, вызванных движением поезда в 3 км от ЦКП “СКИФ”.

Для снижения вибрационных шумов разработана конструкция фундаментов и оснований под зданиями инжектора, накопителя и выносных станций СИ (рис. 24). Конструкция представляет собой многослойную структуру с горизонтальным расположением слоев, обладающих разными механическими свойствами и, соответственно, эффективно гасящими вибрации в разных диапазонах частот. По армированному слою грунта с бетонными сваями формируют двухслойную подушку из уплотненного цементованного грунта с пластифицирующими добавка-

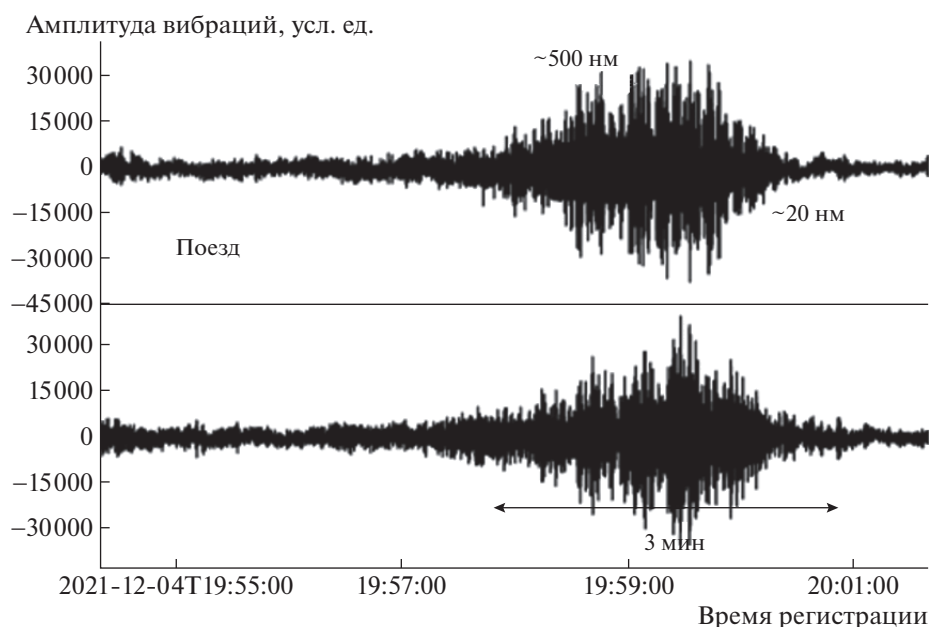


Рис. 23. Сигнал от сейсмодатчика, вызванный прохождением тяжело груженного поезда в 3 км от строительной площадки ЦКП “СКИФ”.

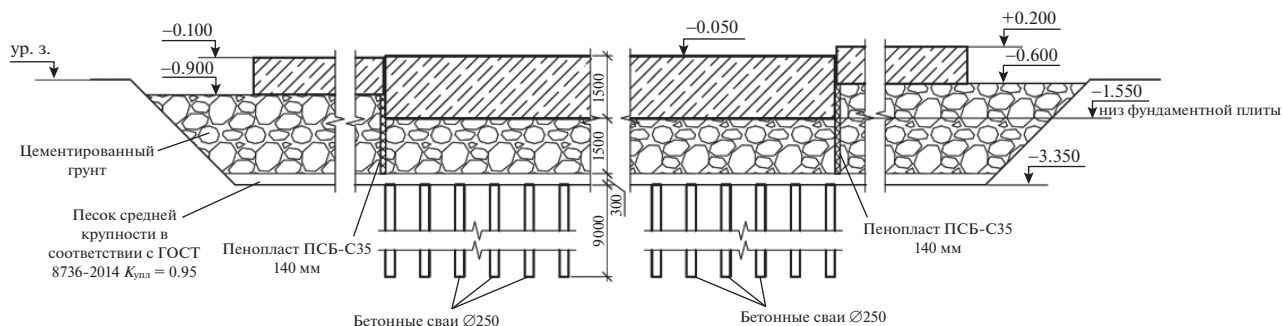


Рис. 24. Конструкция фундамента и оснований зданий ускорительного комплекса и выносных станций.

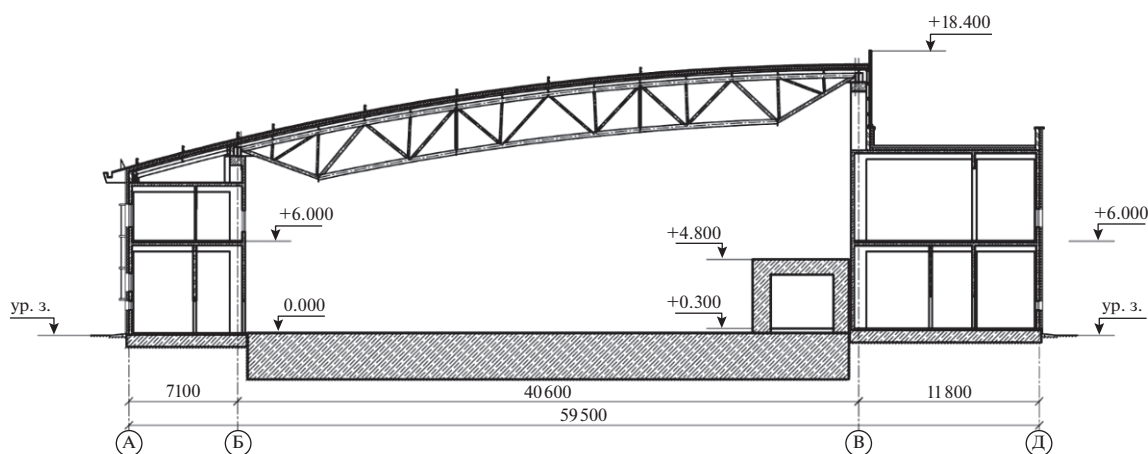


Рис. 25. Сечение здания накопителя.

ми и слоя песка, на которую кладут фундаментную плиту толщиной 1500 мм. По кромке плиты устанавливают пенопластовые вертикальные экраны, задерживающие прохождение сейсмических волн.

Фундаментная плита, на которой будут размещены ускорительный комплекс и станции СИ, отделена от фундаментов внутреннего (системы питания и обеспечения накопителя) и внешнего (офисные и лабораторные помещения) контуров здания накопителя (рис. 25).

Основные инженерные системы, обеспечивающие тепловой режим работы ускорительного комплекса, станций СИ и зданий в целом, спроектированы на базе современного высокоэффективного холодильного оборудования, работающего на фреоне. Применение современных решений позволяет уменьшить теплопотребление ЦКП “СКИФ” в 2 раза, обеспечивая рекуперацию тепла, выделяемого технологическим оборудованием во время работы источника СИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источник СИ поколения 4+ ЦКП “СКИФ” с эмиттансом, приближающимся к волновому пределу в области мягкого и среднего рентгеновского диапазона (~50–80 пкм·рад в зависимости от тока пучка, бетатронной связи и вставных устройств при энергии пучка электронов 3 ГэВ), успешно сооружается в г. Новосибирске. Описаны основные принципы реализации проекта, обсуждены его научная программа, ускорительный комплекс, исследовательская и инженерная инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.
2. Undulators, Wigglers and Their Application / Eds. Elleaume P., Onuki H. London: Taylor & Francis, 2003.
3. Maltseva Yu., Andrianov A., Astrelina K. et al. VEPP-5 Injection Complex: New Possibilities for BINP Electron-Positron Colliders. Proc. IPAC2018, Vancouver, BC, Canada. P. 371.

4. *Gurov S., Akimov A., Anchugov O. et al.* Status of NSLS-II Booster. Proc. PAC2011, New York, NY, USA, WEP201, p. 1864.
5. *Баранов Г.Н., Богомыяков А.В., Левичев Е.Б., Синяткин С.В.* // Сибирский физический журнал. 2020. Т. 15. № 1. С. 5.
6. *Baranov G., Bogomyagkov A., Levichev E. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24. P. 120704.
7. <http://madx.web.cern.ch/madx/>
8. <https://www.saesgetters.com/products-functions/products/neg-pumps%26vacuum-solutions>
9. *Wang D.J., Chen J.R., Hsiung G.Y. et al.* // J. Vac. Sci. Tech. A. 1996. V. 14. P. 2624.
10. *Benvenuti C., Cazeneuve J.M., Chiggiato P. et al.* // Vacuum. 1999. V. 53. P. 219.
[https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00377-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00377-7)
11. *Kersevan R.* Performance of a Narrow-Gap, NEG-Coated, Extruded Aluminium Vacuum Chamber at the ESRF. Proc. EPAC-2000, 26–30 June, Vienna, Austria. P. 2289.
12. *Collins I.R., Ruzinov V.L., Malyshev O.B. et al.* A Photodesorption Study of a TiZrV Coated Stainless Steel Vacuum Chamber. Proc. EPAC-2002, Paris, France, June 2002. P. 2550.
13. *Абакумова Е.В., Анашин В.В., Balewski K. и др.* // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21. № 2. С. 85.
14. *Анашин В.В., Жуков А.А., Краснов А.А., Семенов А.М.* // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 127.
15. *Khrushchev S., Mezentsev N., Lev V. et al.* Superconducting Multipole Wigglers: State of Art. Proc. IPAC2014, Dresden, Germany. P. 4103.
16. *Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V.* Superconducting Multipole Wigglers: Magnetic and Cryogenic Systems. 13th Cryogenics IIR Int. Conf.: Refrigeration Science and Technology. Prague, 2014. Iss. 1. P. 81.
17. *Tanaka T., Kitamura H.* // J. Synchrotron. Rad. 2001. V. 8. P. 1221.
<https://doi.org/10.1107/S090904950101425X>