

На правах рукописи



Кремнев Николай Сергеевич

**КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат технических наук
Шиянков Сергей Владимирович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

КУЛЕВОЙ Тимур Вячеславович – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр Курчатовский институт», заместитель руководителя по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики

ДЕНИСОВ Владимир Викторович – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией пучково-плазменной инженерии поверхности

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «27» октября 2026 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.162.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения российской академии наук и на сайте https://inp.nsk.su/images/KremnevNS_disser.pdf

Автореферат разослан «22» июля 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Шехтман Лев Исаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы

Создание современных ускорительных комплексов со встречными пучками (коллайдеров) – непосредственно сопряжено с задачей получения пучков высокой плотности, малого поперечного сечения, низкой температуры – взаимосвязанных факторов непосредственно влияющих на число столкновений, летящих навстречу друг другу частиц. И если для коллайдеров, использующих легкие частицы, такие как электроны и позитроны, пучки получаются малых размеров и высокой плотности благодаря синхротронному излучению, то для тяжелых частиц и ионов синхротронное излучение практически отсутствует, в доступных диапазонах энергий, и это требует иных способов уменьшения амплитуд бетатронных и синхротронных колебаний.

Степень разработанности темы

Предложенный Г. И. Будкером в 1966 г. метод демпфирования колебаний тяжелых частиц в накопителях, за счет кулоновского взаимодействия между ними и сопутствующим “холодным” пучком электронов, получил развитие в начавшихся с 1967 г. работах по созданию установок ЭПОХА¹. До реализации идей электронного охлаждения, ввиду понимания того, что охлаждение требует значительных токов и энергий электронных пучков, необходимо было добиться успехов в рекуперации энергии однократно проходящих участков охлаждения электронов. В 1972 г. было принято решение о начале строительства специализированного накопительного протонного кольца НАП-М с электронным охлаждением. Уже в 1974 г. начались эксперименты на установке электронного охлаждения и впервые было обнаружено “замагничивание” поперечного движения электронов, а в последствии было открыто явление быстрого электронного охлаждения – кардинально изменившее физическое представление о возможностях метода. Эти исследования положили начало развитию систем электронного охлаждения для разного рода тяжелых частиц, применяемых на различных ускорителях по всему миру. В 2025 г. метод электронного охлаждения преодолел 50-летний рубеж и продолжает активно развиваться.

Установка электронного охлаждения накопителя НАП-М, на которой впервые в мире была экспериментально продемонстрирована высокая эффективность метода, имела физические параметры сопоставимые с параметрами современных систем: величины использованных в ней ведущего магнитного поля (1 кГс) и тока электронного пучка (1 А) остаются актуальными и для современных установок.

¹ Название ЭПОХА образованно из начальных букв слов – Электронный Пучок для ОХлаждения Антипротонов.

Цели и задачи диссертационной работы

В диссертации описывается процесс разработки и конструирования системы электронного охлаждения (СЭО), предназначенной для работы в составе тяжелоионного коллайдера NICA (ОИЯИ, г. Дубна). Крупнейшей установки электронного охлаждения, разработанной в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск).

Высоковольтная СЭО коллайдера NICA обеспечит независимое и одновременное охлаждение двух встречных пучков тяжелых ионов, не требуя перепуска электронного пучка из одного канала коллайдера в другой, что реализуется впервые в мире ^{2,3}.

СЭО NICA использует электростатический метод ускорения непрерывного пучка электронов с током до 1 А на энергию до 2,5 МэВ, и представляет собой две энергетически независимых установки охлаждения использующие высокоэффективные ускорители-рекуператоры.

Магнитная система СЭО NICA выполнена в виде двух непрерывных соленоидов три четверти от длин которых (за пределами высоковольтного объема) выполнены в виде двухканального соленоида с общим корпусом. Магнитное поле в СЭО меняется на трех участках⁴: 0,5 кГс – транспортное поле внутри высоковольтного объема, 1 кГс – транспортное поле за пределами высоковольтного объема, 2 кГс – магнитное поле на участке охлаждения. На границах этих участков установлены согласующие вставки (0,5-1 кГс и 1-2 кГс), что позволяет обеспечить транспортировку электронного пучка без существенного увеличения его температуры по всей транспортной системе. СЭО имеет практически замкнутый по длине магнитопровод (в установке заложены только компенсационные зазоры, не нарушающие целостности внешних корпусов соленоидов, обеспечивающих магнитное экранирование).

² Известно электронное охлаждение, работающее в протон-антипротонном коллайдере FERMILAB (США) на энергии 4,3 МэВ, но работает эта СЭО только для охлаждения пучка антипротонов и соленоид в ней выполнен только на участке охлаждения (система транспортировки электронного пучка состоит из отдельных магнитных элементов).

³ Известно электронное охлаждение LEReC, работающее в тяжелоионном коллайдере RHIC (BNL, США) на энергиях 1,6 МэВ и 2 МэВ, реализованное только с перепуском электронного пучка из одного канала коллайдера в другой, вся магнитная система которого состоит из отдельных элементов. Электроны в этой установке ускоряются высокочастотным линейным ускорителем, производящим электронные пучки сгустками (банчами) с токами до 0,1 А и низким среднеквадратичным эмиттансом (3,4 мкм).

⁴ Меньшие по величине транспортные поля используются из-за ограничения общего энергопотребления установки до 700 кВт.

Научная новизна

СЭО коллайдера NICA рассчитано на охлаждение двух ионных пучков с энергиями до 4,5 ГэВ/нуклон, при достаточно низком энергопотреблении, суммарно не превышающем 700 кВт. Это первая система, выполненная как совокупность двух независимых установок охлаждения, объединенных в двухканальное устройство (рисунок 1). Расстояние между каналами СЭО, соответствует расстоянию между пучками коллайдера, равному 320 мм. Габаритные размеры установки 8×9×7 м (Д×Ш×В).



Рисунок 1 – Магнитные системы и высоковольтные объемы СЭО COSY (слева) и СЭО NICA (справа). Перспективная проекция

Наиболее близким предшественником, можно считать СЭО синхротрона COSY (GSI, Германия)⁵ с энергией электронов 2 МэВ. Сопоставление этих двух установок (без сопутствующих подставок, инженерных сетей и вакуумного оборудования) приведено на рисунке 1, где высота изображенной фигуры человека равна 1,80 м, длина соленоида охлаждения COSY (оранжевый) составляет 2,65 м, длина соленоида охлаждения NICA (оранжевый) с примыкающими согласующими секциями

⁵ Установка была наиболее высоковольтной СЭО, разработанной в ИЯФ СО РАН, и послужила прототипом некоторых элементов магнитной и высоковольтной части, СЭО NICA.

(красный) составляет 6,80 м. Можно сказать, что каждый канал СЭО NICA стал в 2,6 раза больше, чем у установки COSY. Так же увеличился объем высоковольтной части и энергия до 2,5 МэВ. Полная длина верхнего соленоида, без учета высоковольтной части, составляет 33,6 м. Длина нижнего соленоида, без учета высоковольтной части, составляет 30,0 м.

С увеличением характерных размеров устройства выросла и сложность его конструкции. Так, например, увеличение только лишь длины соленоида охлаждения привело к увеличению числа основных обмоток с 40 (СЭО COSY) до 98 (СЭО NICA). Причем для последней это число следует увеличить по числу каналов установки ещё в два раза. Наличие второго канала, необходимого для независимого охлаждения двух проходящих рядом ионных пучков коллайдера NICA, является принципиально новым условием для СЭО. Это потребовало разработки как принципиально новой компоновки систем установки, так и специальных входящих в ее состав элементов (узлов) с малыми вертикальными размерами, способных обеспечить требуемые функциональные параметры. Дополнительная сложность СЭО обусловлена особенностями проекта коллайдера NICA. В частности, расстояние между его каналами, равное 320 мм, определило сложившиеся конструкции большей части элементов магнитной системы и вакуумных камер, а также повлияло на схемы монтажа обмоток и организацию мест доступа к элементам вакуумных камер в сильно стесненных условиях.

Теоретическая и практическая значимость

В работе проведены аналитические и численные расчеты различных элементов конструкции СЭО коллайдера NICA. По результатам которых были выработаны определенные конструктивные и компоновочные решения элементов установки. Разработанная конструкция позволила изготовить магнитную систему для СЭО коллайдера NICA, удовлетворяющую требуемым исходным данным.

Оценить итоговую сложность конструкции можно по статистическим данным взятым из CAD-системы⁶, согласно которым трехмерная модель установки электронного охлаждения состоит из более чем 207 тысяч деталей, из которых 5,5 тысяч – уникальные. Для сравнения: среднестатистический современный автомобиль состоит из примерно 30 тысяч деталей, автомобиль ВАЗ 2101 – примерно из 10 тысяч деталей, а планер современного самолета включает до 40 тысяч деталей. Работа с таким большим объемом геометрических данных требует использования современных средств проектирования (CAD-систем) с достаточно высоким уровнем автоматизации конструкторских работ.

⁶ CAD (англ. Computer Aided Design) – термин, объединяющий современные (главным образом трехмерные) конструкторские системы автоматизированного проектирования (САПР).

Методология и методы работы

Процесс конструирования требует возможности одновременного доступа группы конструкторов, работающих в рамках одного проекта, к актуальным геометрическим и техническим информационным моделям. Немаловажное значение при проектировании имел опыт использования геометрических данных, полученных по результатам физического моделирования магнитных полей СЭО в программном обеспечении MAG 3D (ИЯФ СО РАН). Взаимодействие с САД-системой при этом было организовано посредством обмена данными в нейтральном формате ⁷. Исходная (использованная в физическом моделировании) геометрия, отдельными фрагментами ориентированными по координатным плоскостям, передавалась в конструкторское ПО, где дополнительно обрабатывалась: в основном, сопоставлялись масштабы; полигональная сетка элементов преобразовывалась в контуры; проверялось положение меток центров основных и корректирующих обмоток. Подготовленные таким образом двумерные электронные геометрические модели использовались в качестве исходных (эскизных) данных для проектирования твердотельных моделей элементов магнитной системы установки.

В качестве опорной геометрии ЭМСЕ ⁸ СЭО использовались трехмерные (3D) эскизы равновесных траекторий электронных пучков (аппроксимированных для верхнего и нижнего каналов).

В чертежных (графических, 2D) электронных моделях выполнялось сопоставление СЭО с геометрическими данными обстановки, которые были импортированы из проектной (строительной) документации здания ускорительного комплекса NICA (ЗАО “КОМЕТА”, г. Москва): учитывалось положение проектных осей здания, проемов, и расположение инженерных сетей (каналов предназначенных для организации цепей питания, охлаждения и другой инженерной инфраструктуры). Благодаря налаженному взаимодействию с внешними геометрическими данными, в ходе проектирования системы были решены, в том числе, некоторые критические вопросы: взаимного расположения СЭО и конструкций радиационной защиты; расположения опорных элементов перекрытия помещения высоковольтных баков; конфигурации технических каналов в полу помещения.

Особое внимание при организации работ с такими разнородными данными уделялось их актуализации. Например, при проектировании были учтены не только данные проектной документации (предназначавшейся для строительства помещений, в которых размещается установка), но и скорректированные данные – полученные при геодезической съемке построенных помещений. Наиболее важным было учесть расположение: проемов между помещением высоковольтных объемов и тоннелем коллайдера; опорных ригелей плит радиационной защиты; каналов в полу помещений.

⁷ Общее название форматов обмена данными между различными САД-системами.

⁸ ЭМСЕ – Электронная Модель Сборочной Единицы.

Кроме того, существует необходимость актуализации разрабатываемой конструкции установки с физическими (расчетными) данными, которые, ввиду специфики проектирования уникальных экспериментальных установок, могут изменяться по мере проработки элементов (или многоитерационных уточняющих расчетов), что может привести к значительным изменениям как отдельных элементов, так и установки в целом.

Численное моделирование напряженных состояний элементов конструкции установки проводилось при помощи внутренних средств конечно-элементного анализа САД-системы, состоящий из сред: 1) трехмерного (твердотельного) моделирования деталей; 2) трехмерного моделирования сборочных единиц; 3) двумерного черчения и 4) двух сред инженерного анализа (деталей и сборочных единиц).

При разработке СЭО коллайдера NICA отдельное внимание было уделено вопросам унификации конструктивных решений. При назначении материалов придерживались (по возможности) нормализации и максимального уменьшения их номенклатуры. Решение этих задач необходимо для снижения итоговой трудоемкости изготовления всей установки, особенно учитывая большое число деталей в её составе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная оригинальная конструкция магнитной системы установки электронного охлаждения коллайдера NICA (за пределами высоковольтного объема) позволяет обеспечить транспортировку двух электронных пучков необходимого качества для одновременного охлаждения двух ионных пучков коллайдера.

2. Конструкция вакуумной системы установки электронного охлаждения коллайдера NICA (за пределами высоковольтного объема) позволяет получить требуемое давление остаточного газа внутри вакуумных камер соленоидов магнитной системы установки электронного охлаждения.

3. Принципиально новая конструкция соленоидов электронного охлаждения, размещенных в одном корпусе, позволяет обеспечить достижение необходимого качества продольного поля, путем механического регулирования положения обмоток по новой схеме, а также разместить, помимо обмоток продольного поля, необходимое число обмоток коррекции, и сопутствующих инженерных сетей (питания и гидравлического охлаждения).

4. Новая конструкция тороидов (поворотных соленоидов с местом ввода ионного пучка) СЭО коллайдера NICA с двумя каналами, находящимися в одном корпусе, позволяет осуществить сборку магнитной системы и вакуумной камеры (сложной пространственной конфигурации), путем перемещения только обмоток продольного поля.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на четырех международных семинарах и конференциях:

1. XIII Международный научный семинар памяти профессора В. П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» (Россия, Алушта, 3 – 8 сентября 2019 г.)

2. The 12th International Workshop COOL'19, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Россия, Новосибирск, 23 – 27 сентября 2019 г.)

3. XIV Международный научный семинар памяти профессора В. П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» (Россия, Алушта, 20 – 25 сентября 2022 г.)

4. XXVIII International Conference "Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23", Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Россия, Новосибирск, 11 – 15 сентября 2023 г.)

Доклад на XIII Международном научном семинаре памяти профессора В. П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» (2019г.) был отмечен дипломом 2-ой степени конкурса устных докладов молодых ученых.

Публикации

По материалам диссертации были выполнены две публикации в рекомендованном ВАК при Минобрнауки России рецензируемом научном издании [1, 2], индексируемом в международных базах данных SCOPUS и Web of Science и получен патент [3] на изобретение.

Личный вклад автора

Автор принимал определяющее участие в конструкторской деятельности при разработке СЭО коллайдера NICA, что отражено как в содержании диссертации, так и основных положениях, выносимых на защиту.

Подготовка результатов работы автора к публикации проводилась совместно с соавторами. Приведенные публикации были написаны при непосредственном авторском вкладе соискателя. Заключавшемся в разработке конструкции, главного элемента магнитной системы – соленоида охлаждения, как целого, так и отдельных его элементов – секций, и сопутствующих систем; разработанный соленоид охлаждения послужил прототипом для разработки новой оригинальной конструкции секционированного соленоида охлаждения, на которую был получен патент на изобретение; тороида – элемента магнитной системы установки, в котором происходит встреча (разводка) электронного и ионного пучков, также являющегося комплексным изделием, с различными подсистемами (электрического питания, части вакуумной системы, гидравлической систем), и общей конструкции магнитной системы, за пределами высоковольтного объема; заключающегося не только в концептуальной проработке мест и последовательности сборки элементов магнитной системы, но и оценке влияния сопутствующих инженерных систем, учете расположения элементов оборудования коллайдера, и окружения обусловленного как этими системами, так и строительными конструкциями помещений, доступностью грузоподъемного оборудования.

По разработанной конструкторской документации были изготовлены и успешно испытаны в ИЯФ СО РАН все составные части СЭО коллайдера NICA.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общих сведений о составе системы электронного охлаждения коллайдера NICA, шести глав, заключения и списка литературы. В заключении приводится техническая характеристика разработанной установки и оцениваются некоторые возможности ее дальнейшего улучшения. Полный объем диссертации составляет 169 страниц, включая 98 рисунков, 40 таблиц и библиографический список из 84 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении разбирается актуальность использования систем электронного охлаждения на современных коллайдерах тяжелых частиц, приводятся: задачи решенные в ходе работы, практическая значимость, демонстрируется новизна, формулируются выносимые на защиту положения.

Общие сведения о СЭО коллайдера NICA. Деление установки рассматривается как совокупность трех (основных) систем: высоковольтной, магнитной и вакуумной. Части магнитной и вакуумной систем, расположенные внутри высоковольтного объема (рисунок 2), традиционно рассматриваются по принципу размещения – как принадлежащие к высоковольтной части установки (на рисунке обведены штриховой линией).

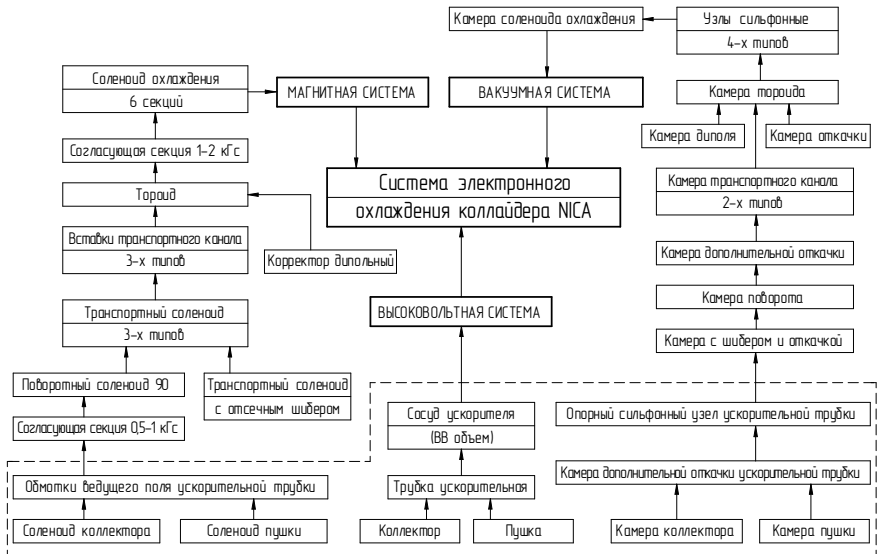


Рисунок 2 – Схема деления основных систем СЭО коллайдера NICA

В первой главе обсуждается соленоид охлаждения. Это одно из ключевых мест установки (рисунок 3). Именно на этом участке протекает физический процесс электронного охлаждения. С инженерной точки зрения это место организации таких систем установки, как: магнитной, корректирующей, вакуумной, прогрева, диагностики пучка, питания, жидкостного охлаждения и защиты.

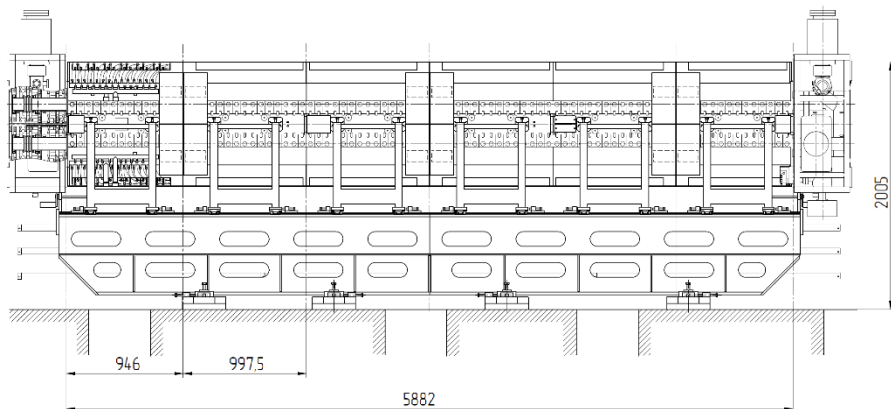


Рисунок 3 – Общий вид участка охлаждения

Конструкция участка должна обеспечивать не только достижение физических параметров (таблица 1), но и возможности: организации сборки и размещения установки на месте эксплуатации; обслуживания (в том числе ремонта) систем этого установки; транспортировки установки к месту эксплуатации.

Таблица 1 – Параметры секции охлаждения коллайдера NICA

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Диаметр электронного пучка в секции охлаждения, мм	5 ... 20
Длина секции охлаждения, м	6,0
Магнитное поле в секции охлаждения, кГс	0,5 ... 2
Вакуум на участке охлаждения, мбар	10^{-11}
Ось нижнего пучка над полом, мм	1340
Ось верхнего пучка над полом, мм	1660

Разработанный секционированный соленоид, позволяет организовать модульную сборку элементов участка охлаждения не прибегая к специальным инженерным средствам организации сборочных работ, путем последовательной сборки шести секций. Корпус секции объединяет в себе два канала установки (рисунок 4).

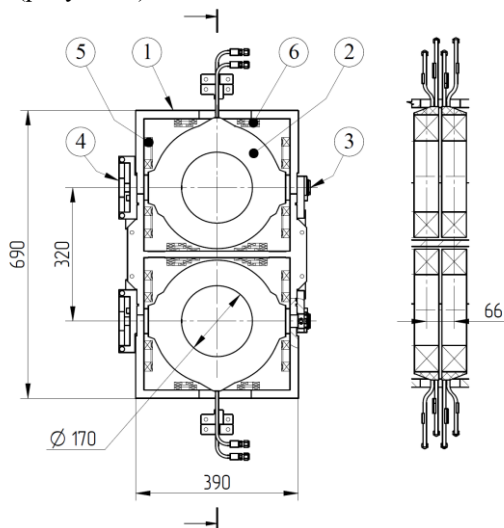


Рисунок 4 – Устройство соленоида охлаждения: 1) корпус; 2) основная обмотка; 3) опора основной обмотки; 4) юстировка основной обмотки; 5) сборки обмоток горизонтальной коррекции; 6) сборки обмоток вертикальной коррекции

В разработанной оригинальной конструкции соленоида охлаждения используются секции двух типов: внутренняя (длиной 997,5 мм), которая содержит по 15 обмоток продольного поля на канал и крайняя (длиной 946 мм), содержащая по 14 обмоток продольного поля на канал. Позволяя разместить по 88 обмоток продольного поля, с шагом расстановки 66 мм, в каждом канале соленоида на участке охлаждения.

В первом разделе приводятся сведения о конструкции основных обмоток соленоида, способе их намотки, приводится схема намотки и способы достижения необходимой точности базирования обмоток в изделии. В частности, точной механической обработки базовых поверхностей вкладышей, установленных в монолитной конструкции обмотки, для обеспечения высокой повторяемости при позиционировании отдельных обмоток.

Во втором разделе описаны новые: механизм юстировки и конструкция опоры (с пружинным узлом) необходимые для установки обмоток продольного поля в корпусе соленоида охлаждения. Необходимость разработки которых была связана с невозможностью организации работы опоры, выполненной по схеме ранее применявшихся опор обмоток СЭО с одним каналом охлаждения.

Механизм юстировки положения обмоток продольного поля – необходим для получения высокой однородности магнитного поля, порядка

$$\Delta B_{\perp}/B = \theta < 10^{-5}, \quad (1)$$

необходимой для быстрого охлаждения при высокой энергии электронов.

В третьем разделе обсуждается конструкция и характеристики сборок обмоток коррекции, предназначенных для обеспечения необходимой коррекции положения электронного пучка.

В четвертом разделе дано описание новой конструкции корпуса секций соленоида охлаждения позволяющего обеспечить: 1) возможность крепления обмоток продольного поля и обмоток коррекции, вводов силового питания, разъемных электрических соединений диагностических систем, элементов гидравлической системы охлаждения обмоток и защитных элементов; 2) необходимое чередование обмоток на всей длине участка охлаждения; 3) возможность юстировки секций при сборке соленоида охлаждения, при сопутствующем контроле его положения методами лазерного трекинга; 4) достижение наибольшей жесткости конструкции, не приводящей к снижению работоспособности (или отказам) юстировочных узлов обмоток.

В пятом разделе содержатся сведения о геометрических измерениях прототипа корпуса секции охлаждения, послуживших основанием для организации назначения размерных цепей и введения улучшений в заключительную конструкцию изделия.

В шестом разделе обсуждаются общие принципы принятых компоновочных решений применяемых в конструкции секций и соленоида охлаждения. Приводятся изображения (рисунок 5), специфицированное описание и техническая характеристика секций соленоида, сведения о составе и объеме электронных геометрических моделей секций.

В седьмом разделе приводятся оригинальные решения опорных конструкций предназначенных для размещения секций соленоида, характерные для современной ускорительной техники построенной на раздельных элементах: 1) индивидуальные подставки секций; 2) станина (гирдер) – размещающая секции соленоида, внутреннее пространство которой

используется для прокладки кабелей электропитания и сигнальных цепей соленоида охлаждения.

Индивидуальные подставки секций снабжены шариковыми каретками необходимыми для их перемещения по линейным рельсовым направляющим гирдера. Что позволяет организовать необходимое для монтажа вакуумных камер данного участка перемещение секций и дает возможность сборки соленоида охлаждения после окончательных магнитных измерений и юстировки обмоток.

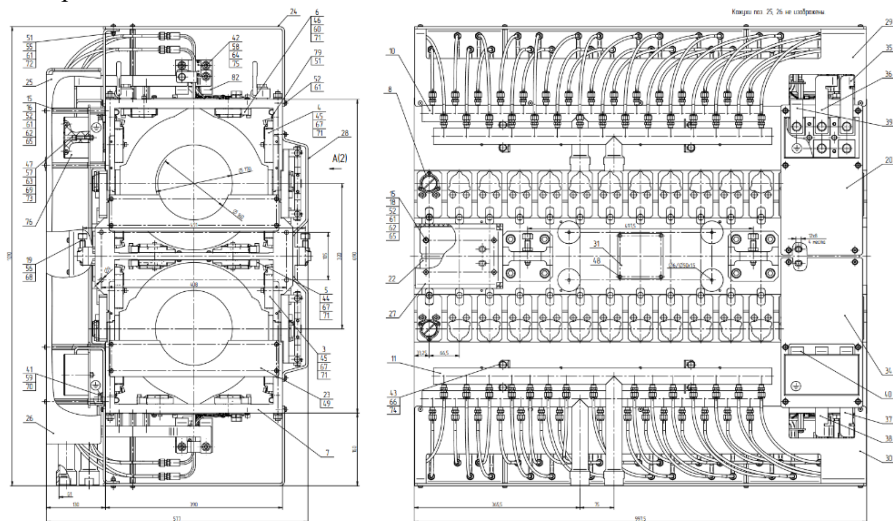


Рисунок 5 – Фрагмент чертежа внутренней секции соленоида

Во второй главе диссертации рассматриваются места ввода-вывода ионного пучка. На этих участках ставятся задачи: точного сведения двух пучков разных частиц; согласования полей транспортных соленоидов и соленоида охлаждения (1 и 2 кГс, соответственно). Что организуется за счет следующих элементов: 1) тороида – поворотного соленоида со ступенчатым изменением окна обмоток, через которое вводится (выводится) ионный пучек; 2) согласующей секции 1-2 кГс обеспечивающей плавное не приводящее к нагреву электронов изменение магнитного поля; 3) дипольного корректора положения ионного пучка.

В первом разделе приводятся сведения о конструкции и техническая характеристика дипольного корректора положения ионного пучка – магнита с O-образным сердечником, обладающего широкой областью «хорошего поля».

Во втором разделе обсуждается тороид новой конструкции (рисунок 6), имеющий, как и другие соленоиды, два канала с обмотками продольного поля. Дополнительно в тороид установлены сборки обмоток поворотного поля с обмотками коррекции размещенные на верхней и нижней стенках каждого канала. Тороид позволяет осуществить поворот электронного пучка на угол 90° с радиусом поворота 1 м. Для установки вакуумной камеры сложной пространственной конфигурации каждая из 30 обмоток продольного поля канала может быть сдвинута (при минимальной частичной разборке корпуса) и надвинута поверх установленной вакуумной камеры тороида с требуемым угловым шагом определенным его конструкцией. Для облегчения перемещения обмоток их опоры выполнены из бронзы, что формирует пару с низким трением для стального корпуса соленоида.

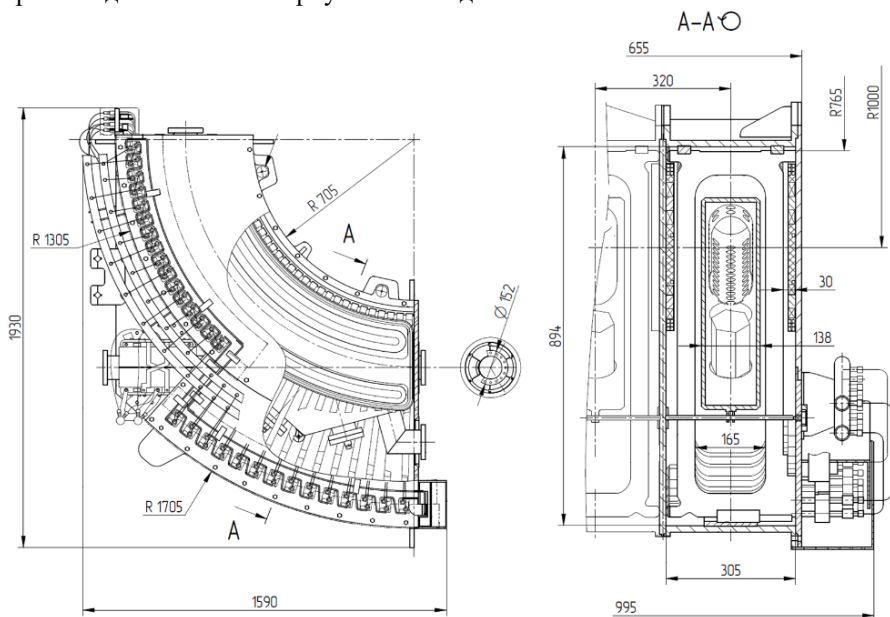


Рисунок 6 – Общий вид тороида

В третьем разделе дается описание согласующей секция 1-2 кГс. Устанавливаемая в промежутках между тороидом и соленоидом охлаждения согласующая секция (рисунок 7) определяет заключительные места сборки участка охлаждения. Ее конструкция обеспечивает возможность доступа к вакуумным камерам СЭО для установки компенсаторных сильфонных узлов (3, рисунок 7) только за счет разборки корпуса. Такая разборка не требует

снятия обмоток продольного поля, обмотки могут быть сдвинуты на прикрепленную к соленоиду охлаждения часть корпуса (4а, рисунок 7). Примененные конструктивные решения предотвращают вывешивание обмоток на вакуумной камере, что позволяет камере свободно перемещаться в продольном направлении. Остальные составные части корпуса согласующей секции позволяют замкнуть металл корпусов соленоида охлаждения и тороида практически в сплошной магнитопровод (магнитный экран).

Место вывода ионного пучка является зеркальным повторением места его ввода.

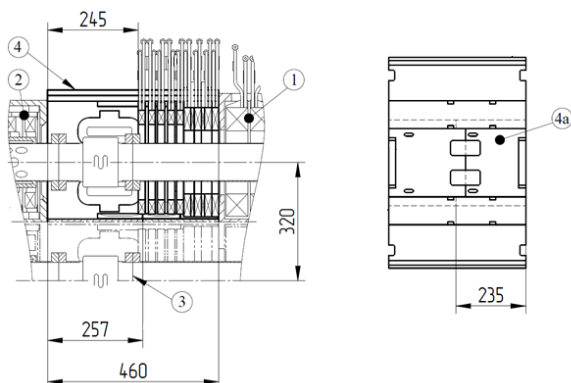


Рисунок 7 – Слева – устройство согласующей секции (обмотки сдвинуты):

- 1) крайняя секция соленоида охлаждения; 2) тороид; 3) сифонный узел;
- 4) корпус согласующей секции. Справа – корпус

В третьей главе обсуждаются элементы, отвечающие за транспортировку электронного пучка. Их можно укрупненно поделить на пять групп: 1) поворотные соленоиды; 2) прямолинейные соленоиды; 3) вставки с отсекающими шиберами и откачкой; 4) согласующие секции 0,5-1 кГц; 5) замыкающие вставки. Расположение элементов магнитной системы соответствует рисунку 8. Каждая группа элементов рассматривается в отдельном разделе главы, в соответствии с обозначенным порядком групп.

В первом разделе рассматриваются одноканальные поворотные соленоиды (BEND) с радиусом поворота 1 м: 1) шесть одинарных поворотных соленоидов; 2) два поворотных соленоида с измененной нижней стенкой для установки на транспортный соленоид (LINE18).

Во втором разделе – прямолинейные соленоиды, в составе: 1) четырех двухканальных секции прямолинейного транспортного соленоида (LINE2) длиной по 1900 мм, внутри которых располагаются корректоры уменьшающие

ларморовское вращение по сечению пучка с вращением фазы ларморовского движения в поворотах; 2) двух удлиняющих секций прямолинейного транспортного соленоида (LINE18) нижнего канала длиной по 1805 мм, устанавливаемых под поворотным соленоидом верхнего канала; 3) двух одноканальных секций прямолинейного транспортного соленоида (LINE2-5) длиной по 1995 мм.

В третьем разделе – четыре одноканальных соленоида (LINE08) длиной по 855 мм, внутри которых размещаются откачные порты, вакуумные шиберы и корректоры (EDIP) для ларморовского вращения пучка как целого. В элементах этой группы предусмотрена возможность компенсации отклонений длин сопрягаемых частей до 15 мм.

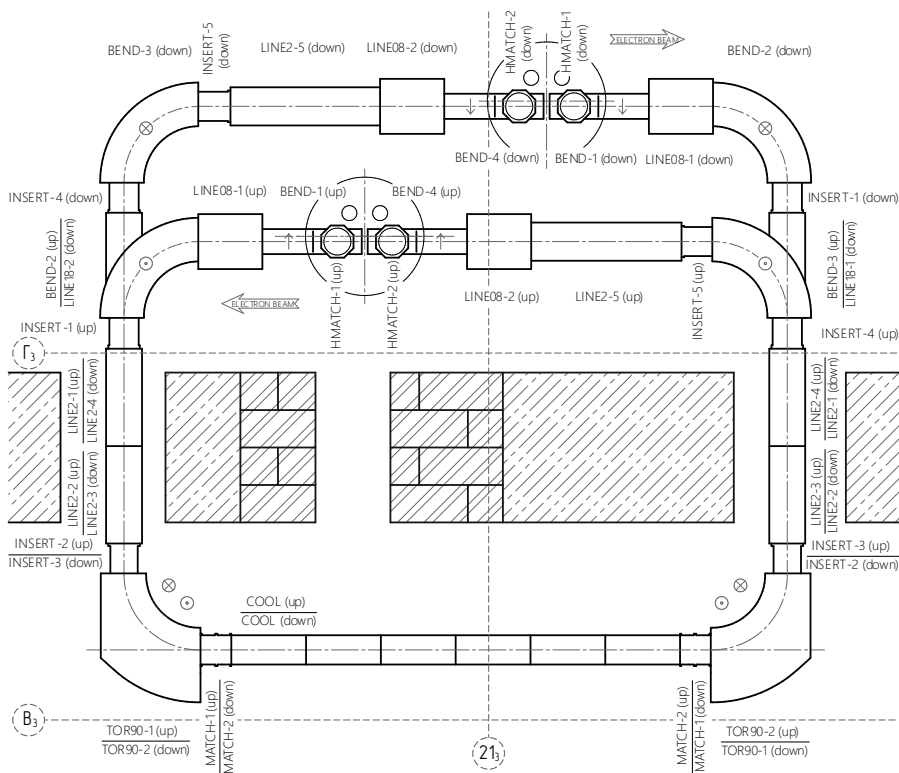


Рисунок 8 – Схема магнитной системы установки с наименованиями элементов

В четвертом разделе – четыре согласующих секции (НMATCH), которые устанавливаются после ускоряющей и перед замедляющей трубками высоковольтного объема.

В пятом разделе – вставки транспортного канала (INSERT) длиной по 405 мм: 1) две двухканальных вставки, верхний и нижний каналы которых объединены в одном корпусе и внутри которых размещены корректоры (EDIP) для ларморовского вращения пучка как целого (дипольная мода); 2) две одноканальных вставки, устанавливаемые в верхнем канале после прямолинейного соленоида (LINE2); 3) четыре одноканальных вставки.

При разработке элементов транспортной части магнитной системы установки ставились следующие задачи конструирования: максимальное подобие элементов внутри каждой из пяти групп, обеспечение необходимости «замыкания» магнитопровода при наличии мест компенсации отклонений длин элементов (при заключительной сборке установки) и необходимость установки соленоидов внутри проемов стен радиационной защиты (мертвая зона крана).

Для размещения элементов транспортной системы на месте эксплуатации их опоры спроектированы с учетом конструктивных особенностей помещения, в котором они будут установлены. При конструировании учитывалась именно реальная обстановка, снятая путем геодезических измерений готового помещения.

В четвертой главе обсуждается высоковольтная часть СЭО. Она выполнена по модульному принципу из 42 секций, являющихся составными частями каскадного трансформатора. Внутри секций размещаются колонны ускорителя и рекуператора. Потенциал высоковольтного терминала составляет 2500 кВ, такое напряжение достигается на секциях трансформатора с шагом 60 кВ/каскад, суммарные тепловыми потерями в нем около 15 кВт.

Для получения электронов используется пушка, позволяющая управлять профилем электронного пучка, сопряженная с колонной электростатического ускорителя. На колонне рекуператора устанавливается коллектор с высокой эффективностью рекуперации энергии (более 10^{-6} при токе в 0,9 А).

Все части высоковольтной системы помещаются внутри высоковольтного объема (бака) в котором создается избыточное давление до 8 бар элегаза (SF6).

В пятой главе рассматривается система измерений и коррекции электронного пучка. Приводятся схемы расположения: датчиков положения пучков; корректоров формы и положения электронного пучка; дипольных

корректоров ларморовского вращения электронного пучка как целого (EDIP (рисунок 9), EDIP-L). Последние (EDIP, EDIP-L) выполнены в виде отдельных изделий, состоящих из восьми коротких обмоток, оказывающих «ударное» воздействие на движение пучка.

В первом разделе приводятся данные о датчиках положения электронного и ионного пучков. Всего в установке используется 34 датчика положения пучка, четыре из которых установлены внутри двух высоковольтных баков. Четырехэлектродные датчики выполнены в виде отдельного элемента вакуумной камеры.

Во втором разделе обсуждаются дипольные корректоры ларморовского вращения пучка как целого, устанавливаемые внутри вставок INSERT (EDIP) транспортного канала и соленоидов LINE08 (EDIP-L). Их конструкция существенно меняется в зависимости от места их установки, что главным образом определяется наличием свободного пространства (зазором) между обмотками продольного поля и вакуумной камеры.

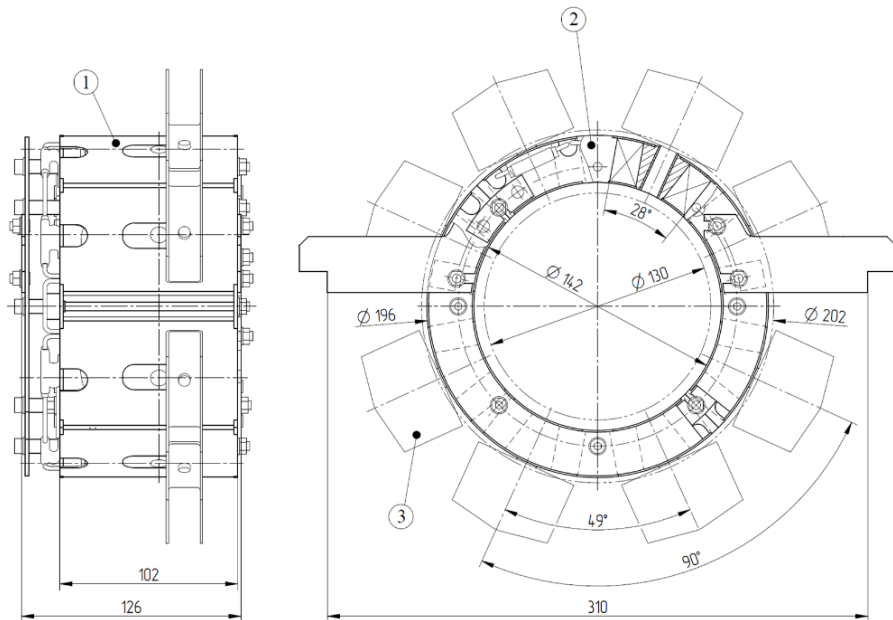


Рисунок 9 – Конструкция дипольного корректора вставки транспортного канала (INSERT): 1) обмотка; 2) обечайки корпуса; 3) радиатор

Из-за расположения в стесненных условиях (в зазоре равном 36 мм) над прогреваемой до 300–400 °С вакуумной камерой, корректор EDIP (рисунок 9) выполнен в виде обмоток сложной формы. Его обмотки изготавливаются из медного проводника со стойкой к высоким температурам изоляции и к сердечникам крепятся теплоотводящие пластинами (радиаторами). Обмотки собираются в кольцо с толщиной 27 мм, таким образом максимально приближаясь к внутренней поверхности окна обмоток продольного поля вставок (INSERT).

В шестой главе приводятся характеристики, схемы и описание вакуумной системы. Для достижения целевого значения вакуума на участке охлаждения с давлением 10^{-11} мбар, конструкции вакуумных камер выполняется с греющим элементом и тепловой изоляцией, обеспечивающими температуру прогрева до 300 °С. Принципиально выделяются три вакуумных участка: 1) вакуумная система пушки (коллектора); 2) вакуумная система центральной части; 3) вакуумная система транспортного канала.

Главным образом, применяются вакуумные камеры типовой конструкции (рисунок 10) с прогревом, изоляцией и датчиками положения пучка, которые отличаются продольными размерами. В тороидах устанавливаются вакуумные камеры с расходящимися каналами: для ввода (вывода) ионного пучка и портом для подключения откачного оборудования участка охлаждения.

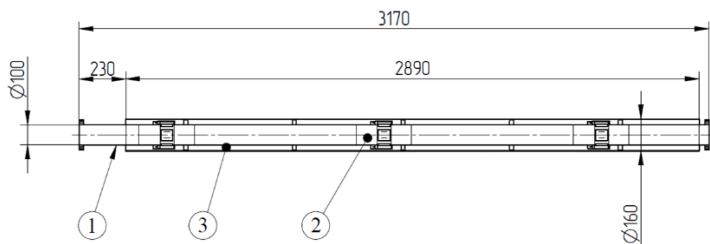


Рисунок 10 – Продольный разрез вакуумной камеры соленоида охлаждения:

- 1) камера; 2) датчик положения пучка; 3) нагреватель и теплоизоляция

В **Заключении** формулируются основные результаты работы, итогом которой является оригинальная конструкция СЭО коллайдера NICA, изготовленная и успешно испытанная в ИЯФ СО РАН, разработанная исходя из предъявленных требований и ограничений, необходимых как для успешного встраивания в структуру коллайдера, так и для обеспечения эффективной, достаточно экономичной (в плане энергоэффективности) работы системы.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. Конструкция центрального соленоида высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA / Н. С. Кремнев, М. И. Брызгунов, А. В. Бублей [и др.] – Текст: электронный // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2020. – Т. 17, № 4 (229). – С. 411-416. URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_4/07_Kremnev.pdf (дата публикации: 18.08.2020)
2. Конструкция магнитной системы высоковольтного электронного охлаждения коллайдера NICA / Н. С. Кремнев, М. И. Брызгунов, А. В. Бублей, [и др.] – Текст: электронный // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2024. Т. 21, № 3 (254). – С. 352-361. URL: <https://pepan.jinr.ru/index.php/PepanLetters/article/view/1185/760> (дата публикации: 08.08.2024)

Патент на изобретение:

3. Патент №2837863 Российская Федерация, МПК H01F 6/04 (2006.01), H01F 6/04 (2025.01). Соленоид охлаждения : № 2024121860 : заявл. 01.08.2024 : опубл. 07.04.2025 / Кремнев Н. С., Пархомчук В. В., Рева В. Б. [и др.] ; заявитель ИЯФ СО РАН. – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Кремнев Николай Сергеевич

**КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 22.06.2026.
Подписано в печать 23.06.2026.
Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №14

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11