

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

КРЕМНЕВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ
**КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
КОЛЛАЙДЕРА NICA**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Шиянков Сергей Владимирович

Новосибирск – 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1 Соленоид охлаждения	14
1.1 Конструкция основных обмоток	21
1.2 Юстировка основных обмоток	36
1.3 Сборки обмоток коррекции	40
1.4 Корпус соленоида охлаждения	48
1.5 Прототип корпуса секции	56
1.6 Секция соленоида охлаждения	59
1.7 Подставки и гирдер	65
Глава 2 Ввод-вывод ионного пучка	73
2.1 Дипольный корректор ионного пучка	75
2.2 Торойд	77
2.3 Согласующая секция 1-2 кГц	86
Глава 3 Транспортировка электронного пучка	93
3.1 Поворотный соленоид	96
3.2 Прямолинейные соленоиды	101
3.3 Соленоид с отсекающим шиббером	107
3.4 Согласующая секция 0,5-1 кГц	112
3.5 Вставки транспортного канала	115
Глава 4 Высоковольтная часть	119
Глава 5 Система измерений и коррекции электронного пучка	124
5.1 Датчики положения электронного и ионного пучков	127
5.2 Дипольные корректоры ларморовского вращения	128
Глава 6 Вакуумная система	133

Заключение	141
Список литературы	144
Приложение А (справочное) Порядок сборки магнитной системы установки	153
Приложение Б (справочное) Фотографии основных частей СЭО коллайдера NICA	161
Приложение В (справочное) СЭО коллайдера NICA. Общие виды	168

Введение

Актуальность избранной темы

Создание современных ускорительных комплексов со встречными пучками (коллайдеров¹) – 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, например, за счет установок электронного охлаждения (рисунок 1).

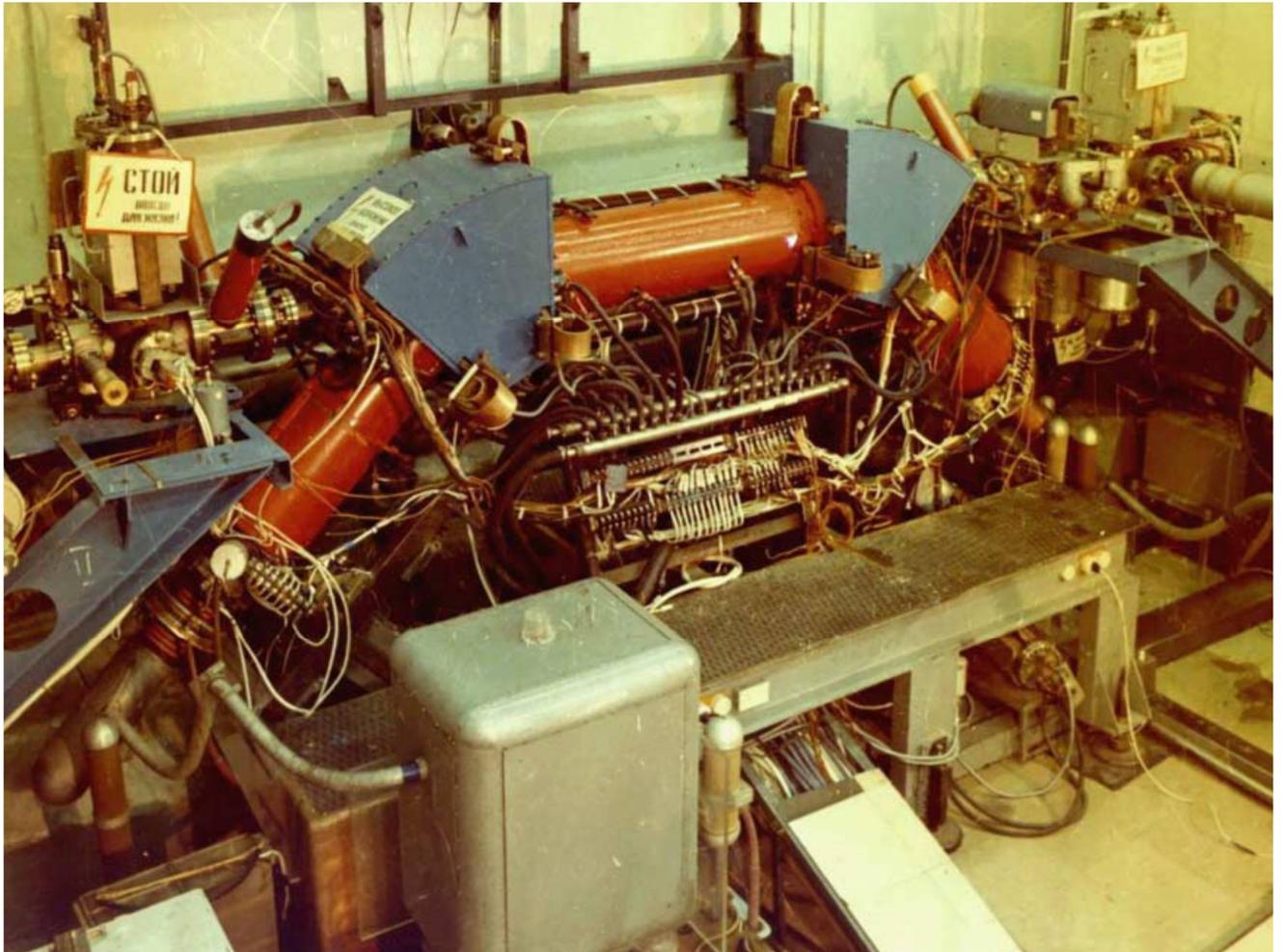


Рисунок 1 – Установка электронного охлаждения накопителя НАП-М

¹ Коллайдер – термин, обозначающий установки со встречными пучками заряженных частиц, происходит от англ. глагола collide – сталкиваться.

Степень разработанности темы

Предложенный Г.И. Будкером в 1966 г. [1] 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 [2]. До реализации идеи 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 [3]. 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, изображенной на рисунке 1. Там же впервые было обнаружено “замагничивание” поперечного движения электронов и в последствии открыто явление быстрого электронного охлаждения – кардинально изменившее физическое представление о возможностях метода [4]. 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 [5].

Установка электронного охлаждения накопителя НАП-М, на которой впервые в мире была экспериментально продемонстрирована высокая эффективность метода, имела физические параметры [6], приведенные в таблице 1. Можно отметить, что величины использованных в ней ведущего магнитного поля (1 кГс) и тока электронного пучка (1 А) остаются актуальными и для современных установок.

Таблица 1 – Параметры установки электронного охлаждения накопителя НАП-М

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Энергия электронов, кэВ	до 100
Ток электронов, А	до 1
Ведущее магнитное поле, кГс	1
Длина участка охлаждения, м	1
Относительная поперечная скорость электронов	до $5 \cdot 10^{-3}$
Стабильность энергии	до $1 \cdot 10^{-4}$

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

Цели и задачи

В диссертации описывается процесс конструирования системы электронного охлаждения (СЭО), предназначенной для работы в составе тяжелоионного коллайдера NICA¹ (ОИЯИ, г. Дубна [7]). Эта СЭО является крупнейшей установкой электронного охлаждения, разработанной в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) [8].

Для комплекса NICA в ИЯФ СО РАН были разработаны две системы электронного охлаждения. Первая – для бустера, низковольтная (поставлена в ОИЯИ в 2017 г.), показавшая свою эффективность при работе бустера в 2022 г. [9] Вторая – высоковольтная система, необходимая для охлаждения ионных пучков в коллайдере [10], 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. Установка электронного охлаждения, работающая в составе протон-антипротонного коллайдера FERMILAB (США) на энергии 4,3 МэВ [11], используется только для охлаждения пучка антипротонов, а СЭО LEReC тяжелоионного коллайдера RHIC (BNL, США), работающая на энергиях 1,6 МэВ и 2 МэВ [12], позволяет проводить охлаждение только в переменном режиме (с перепуском пучков). Более того, в электронном охлаждении LEReC используется высокочастотный линейный ускоритель – производящий электронные пучки в виде сгустков (банчей) с токами до 0,1 А и низким среднеквадратичным эмиттансом (3,4 мкм). Перечисленные особенности делают эти установки совершенно отличными от СЭО коллайдера NICA (энергия электронов до 2,5 МэВ, ток электронов 1 А, непрерывный пучок). Следует отметить, что системы транспортировки электронного пучка установок FERMILAB и LEReC RHIC выполнены из дискретных элементов (отдельные магнитные элементы, формируют оптическую структуру с сильной фокусировкой) [13], при этом, только в установке FERMILAB на участке охлаждения используется соленоид.

Одна из важных особенностей СЭО коллайдера NICA состоит в том, что магнитная система всей установки представляет из себя два протяженных-непрерывных соленоида (для каждого канала коллайдера) с практически замкнутым магнитопроводом (в установке заложены только компенсационные зазоры, не нарушающие целостности внешних корпусов соленоидов, обеспечивающих магнитное экранирование). При этом, три четверти от длин соленоидов (за пределами высоковольтного объема) выполнены в виде двухканального соленоида с общим корпусом².

¹ NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) – установка ионного коллайдера на базе нуклотрона (перевод).

² Обмотки соленоидов магнитной системы установки, расположенные за пределами высоковольтного объема, устанавливаются внутри металлических корпусов (магнитопроводов) необходимых для экранирования внешнего магнитного поля, создаваемого основными обмотками.

Научная новизна

Наиболее близкой высоковольтной системой охлаждения для ионных пучков, использующей непрерывный пучок электронов с энергией 2 МэВ, является СЭО синхротрона COSY (GSI, Германия) [14]. Данная установка так же была разработана в ИЯФ СО РАН и послужила прототипом при разработке различных элементов магнитной системы и высоковольтной части установки охлаждения коллайдера NICA, что будет отражено в следующих разделах диссертации. Сопоставление этих двух установок (без сопутствующих подставок, инженерных сетей и вакуумного оборудования) приведено на рисунке 2, где для наглядности, приведена фигура человека ростом 1,80 м; длина соленоида охлаждения (оранжевый) COSY равна 2,65 м; длина соленоида охлаждения (оранжевый) с примыкающими согласующими секциями (красный) NICA равна 6,80 м. Заметим, что каждый канал охлаждения стал в 2,6 раза больше, чем это было у установки COSY. Также увеличился и объем высоковольтной части, и энергия электронного пучка до 2,5 МэВ.



Рисунок 2 – Магнитные системы и высоковольтные объемы установок электронного охлаждения COSY (слева) и NICA (справа). Перспективная проекция

Следует пояснить, что с увеличением характерных размеров установки, растет и сложность ее конструкций. Так, например, увеличение только лишь длины соленоида охлаждения с 2,7 до 5,9 м приводит к увеличению числа основных обмоток с 40 (СЭО COSY) до 98 (СЭО NICA). Несложно рассчитать число обмоток, приходящихся на погонный метр длины соленоида охлаждения: для СЭО COSY оно составит 14,8 шт/м; для СЭО NICA уже 16,6 шт/м. Причем для последней это число следует увеличить по числу каналов установки еще в два раза – до 33,2 шт/м, то есть только лишь плотность расстановки обмоток в соленоиде охлаждения увеличилась в 2,24 раза. Кроме того, все эти обмотки требуется разместить вместе с сопутствующими устройствами их креплений и юстировки¹. 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. Фотографии готовых составных частей магнитной системы приводятся в приложении Б.

Оценить итоговую сложность конструкции можно по статистическим данным, взятым из САД-системы², согласно которым трехмерная конструкторская модель (ЭМСЕ³) установки электронного охлаждения состоит из более чем 207 тысяч деталей, из которых 5,5 тысяч – уникальные. Для сравнения: среднестатистический современный автомобиль, по подсчетам инженеров японской компании Toyota, состоит из примерно 30 тысяч деталей [15], автомобиль ВАЗ 2101 состоит примерно из 10 тысяч [16], а планер современного самолета включает до

¹ Почти 200 отдельных элементов, обмоток весом по 18 кг, с креплениями и механизмами их юстировки размещаются в два яруса на участке длиной 6 м, с шагом 66 мм.

² САД (англ. Computer Aided Design) – термин, объединяющий современные (трехмерные) конструкторские системы автоматизированного проектирования.

³ ЭМСЕ – электронная модель сборочной единицы.

40 тысяч деталей [17]. Работа с таким большим объемом геометрических данных, конечно, требует использования современных средств проектирования достаточно высокого уровня (CAD-системы).

Помимо геометрических данных, необходимых для организации конструкторской и технологической подготовки производственных задач, в ЭМСЕ СЭО NICA учитывались данные о расположении геодезических меток – необходимых для организации сборки (позиционирования) составных частей СЭО в соответствии с проектными данными, при использовании современных методов геодезических измерений (лазерного трекинга). Причем метки в ЭМСЕ СЭО ассоциативно связаны с конструктивными элементами составных частей установки¹.

Решения по организации систем и частей установки были приняты исходя не только из необходимости получения требуемых физических параметров, но также учитывая существенные затруднения проведения различных сборочных операций, особенно в местах, располагающихся внутри замкнутых корпусов элементов магнитной части. Описанные в диссертации подходы к организации конструкции протяженной магнитной системы, состоящей из функциональных модулей (соленоидов), во многом используют принципы построения современных коллайдеров и накопителей, и могут быть использованы не только в будущих работах в области СЭО, но и в другой ускорительной технике.

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 (разработанном в ИЯФ СО РАН). Взаимодействие с CAD-системой при этом было организовано посредством обмена данными в формате DXF². Исходная (использованная в физическом моделировании) геометрия, отдельными фрагментами ориентированными по координатным плоскостям, передавалась в конструкторское ПО, где дополнительно обрабатывалась: в основном, сопоставлялись масштабы³; полигональная сетка элементов преобразовывалась в контуры; проверялось положение меток центров основных и корректирующих обмоток. Подготовленные

¹ Геодезические метки отражают текущее расположение составных частей в ЭМСЕ СЭО.

² DXF (англ. Drawing eXchange Format, разработчик Autodesk) – формат обмена графической информацией между различными CAD-системами.

³ Необходимость сопоставления (перевода) масштабов геометрических данных, в данном случае, обусловлена только спецификой экспорта из расчетного ПО в конструкторское. Такое преобразование не является необходимой стадией, связанной с экспортом внешних геометрических данных конструкторского ПО.

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 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 [18]): 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.

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 механических напряженных состояний элементов конструкции установки проводилось при помощи внутренних средств конечно-элементного анализа CAD-системы Solid Edge [19] (Siemens PLM Software, Германия) применяемой в НКО¹ ИЯФ СО РАН. CAD-система включает в себя следующие среды: 1) трехмерного

¹ Научно Конструкторский Отдел – структурное подразделение Института Ядерной Физики им. Г.И. Будкера Сибирского Отделения Российской Академии Наук, занимающееся конструированием экспериментальных электрофизических установок.

(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. Это коснулось, в первую очередь, основной части обмоток ведущего поля (всей установки), где были использованы одинаковые: штуцеры водяных соединений с переходными элементами (предназначенными для пайки к проводнику обмотки); флажки силовой электрической коммутации. В установке были унифицированы места размещения термовыключателей (элементы системы защиты от перегрева). Для внешних гидравлических соединений элементов магнитной системы были использованы фитинги одного вида и типоразмера. Унифицированы опорные (юстировочные) узлы и места силовых электрических соединений магнитных элементов установки.

При назначении материалов придерживались (по возможности) нормализации и максимального уменьшения их номенклатуры: корпуса изготавливались из листов одного сортамента; стойки (для размещения площадок под сигнальную коммутацию и коммутацию цепей прогрева) из одинаковых прутков, а сами площадки – из листа одного типа; электрозащитные кожухи – из листов поликарбоната одной толщины. Решение этих задач необходимо для снижения итоговой трудоемкости изготовления всей установки, особенно, учитывая огромное число деталей в ее 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.

По материалам диссертации были выполнены две публикации в рекомендованном ВАК при Минобрнауки России рецензируемом научном издании [23, 26], индексируемом в международных базах данных SCOPUS и Web of Science:

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)

Получен патент на изобретение:

1. 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.

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

Личный вклад автора

Приведенные публикации были написаны при непосредственном авторском вкладе соискателя. Для публикации 1, автор занимался разработкой конструкции двухканального секционированного соленоида, объединяющей соленоиды верхнего и нижнего каналов, для охлаждения ионных пучков коллайдера NICA: включая его обмотки; юстировочные узлы; разработку общих видов опорных конструкций соленоида и их прочностные расчеты; общий вид вакуумных камер участка охлаждения.

Разработанный соленоид охлаждения послужил прототипом для разработки новой оригинальной конструкции секционированного соленоида охлаждения, на которую был получен патент на изобретение. Так, в публикации 2, вклад автора заключался в разработке: усовершенствованной конструкции соленоида охлаждения, представляющего собой двухканальную систему; новой конструкции тороида; компоновки магнитной системы установки за пределами высоковольтного объема, определении общей конфигурации магнитных элементов транспортной системы установки и ключевых (заключительных) мест сборки магнитной системы.

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: разработке оригинальной конструкции магнитной системы установки за пределами высоковольтного объема и ее главного элемента – соленоида охлаждения, как целого, так и отдельных его элементов – секций, и сопутствующих систем; тороида – элемента магнитной системы установки, в котором происходит встреча (разводка) электронного и ионного пучков; участие автора заключалось 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.

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.

Глава 1 Соленоид охлаждения

Для реализации электронного охлаждения необходимо обеспечить условия создания и проведения по определенному пути электронного пучка и добиться его корректного совмещения с ионами¹. Это определяет наличие как минимум трех систем в установке: высоковольтной (ускоритель-рекуператор), вакуумной и магнитной. Общее деление этих систем по элементам показано на рисунке 3. При этом элементы магнитной и вакуумной частей, обведенные на рисунке 3 штриховой линией, располагаются внутри высоковольтного объема (бака) ускорителя-рекуператора и традиционно рассматриваются как принадлежащие высоковольтной части, то есть по принципу размещения.

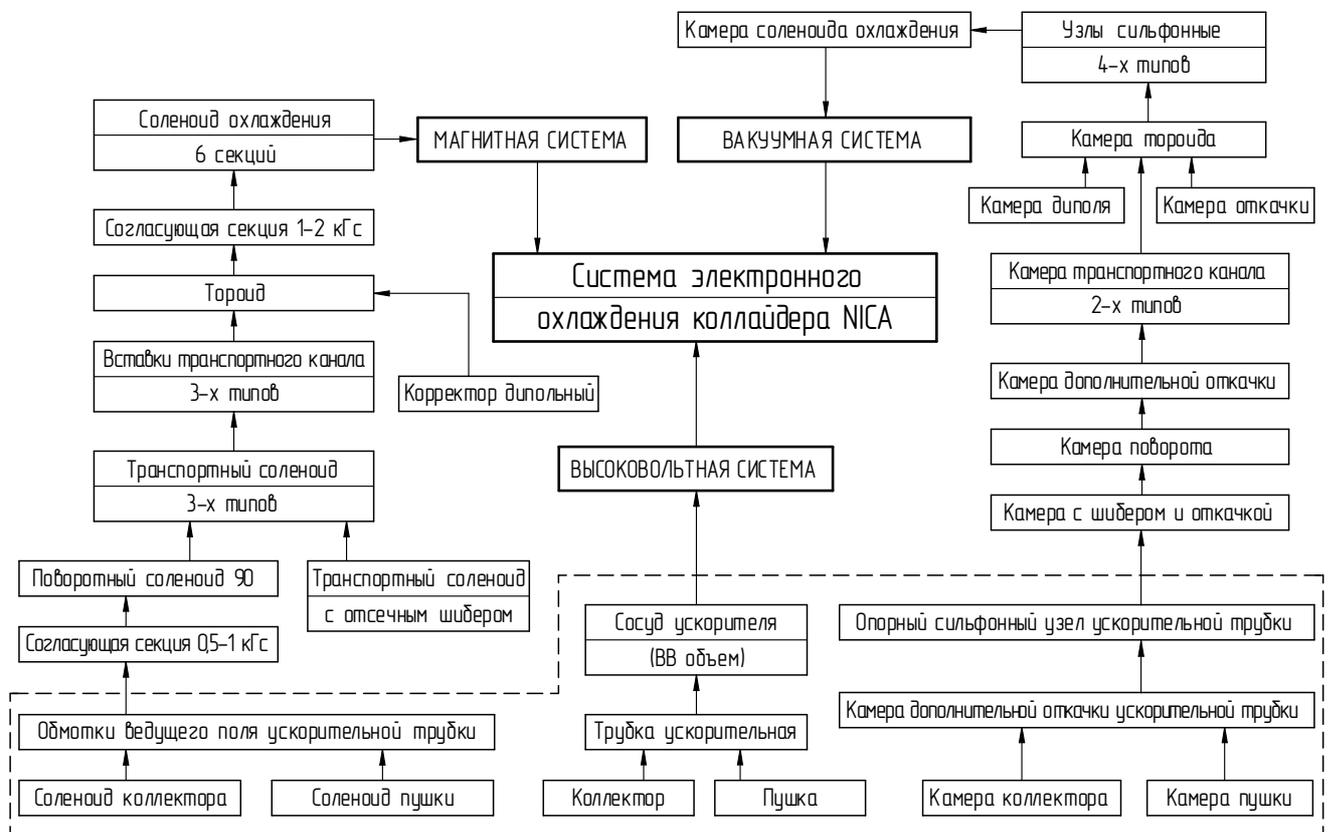


Рисунок 3 – Схема деления основных систем СЭО коллайдера NICA

Соленоид охлаждения (центральный соленоид) является одним из ключевых мест установки как с физической позиции, так и с инженерной. Именно на этом участке проходит физический процесс электронного охлаждения, что обеспечивается совокупностью различных «инженерных» систем установки: магнитной (включая устройства коррекции), вакуумной

¹ Что справедливо и для других сортов тяжелых частиц, не охлаждаемых естественным образом.

(включая цепи прогрева), диагностики пучка, питания, жидкостного охлаждения и защиты. Поэтому конструкция соленоида охлаждения должна обеспечивать не только качество ведущих полей и точность совмещения ионного и электронного пучков, но и возможность осуществления сборки устройства и его размещения на ускорительном комплексе, а также возможность обслуживания (в том числе ремонта) компонентов всех систем этого устройства. В связи с чем при проектировании требуется не только корректно организовать выше перечисленные системы в изделии, но и учесть места размещения установки в ускорительном комплексе (включая доступность этих мест для проведения такелажных работ), а также учесть некоторые промежуточные стадии жизненного цикла, например, транспортировку узлов СЭО. С целью снижения временных затрат проектирование осуществлялось посредством организации параллельных процессов разработки различных систем и элементов установки (в том числе «запараллеливания» конструирования и физических расчетов).

Согласно «Техническому проекту ускорительного комплекса NICA» [20] на участке охлаждения должны быть обеспечены основные параметры, приведенные в таблице 2. Электрический режим работы соленоида – «нормально проводящий».

Таблица 2 – 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

Общий вид участка охлаждения (по версии ОИЯИ) к моменту разработки физического проекта (2016г.), представленный на рисунке 4, можно считать некой стартовой точкой представления о конфигурации соленоида охлаждения.

Разработанный соленоид охлаждения имеет вид, определяемый компоновкой, представленной на рисунке 5. Секционирован. Корпус (экранирующий магнитопровод) выполнен в виде двухуровневого закрытого короба. Длина участка, определенная техническим заданием, в процессе проектирования скорректирована до 5882 мм (рисунок 6), что обусловлено фактическими размерами, шагом расстановки обмоток и конструкцией секций.

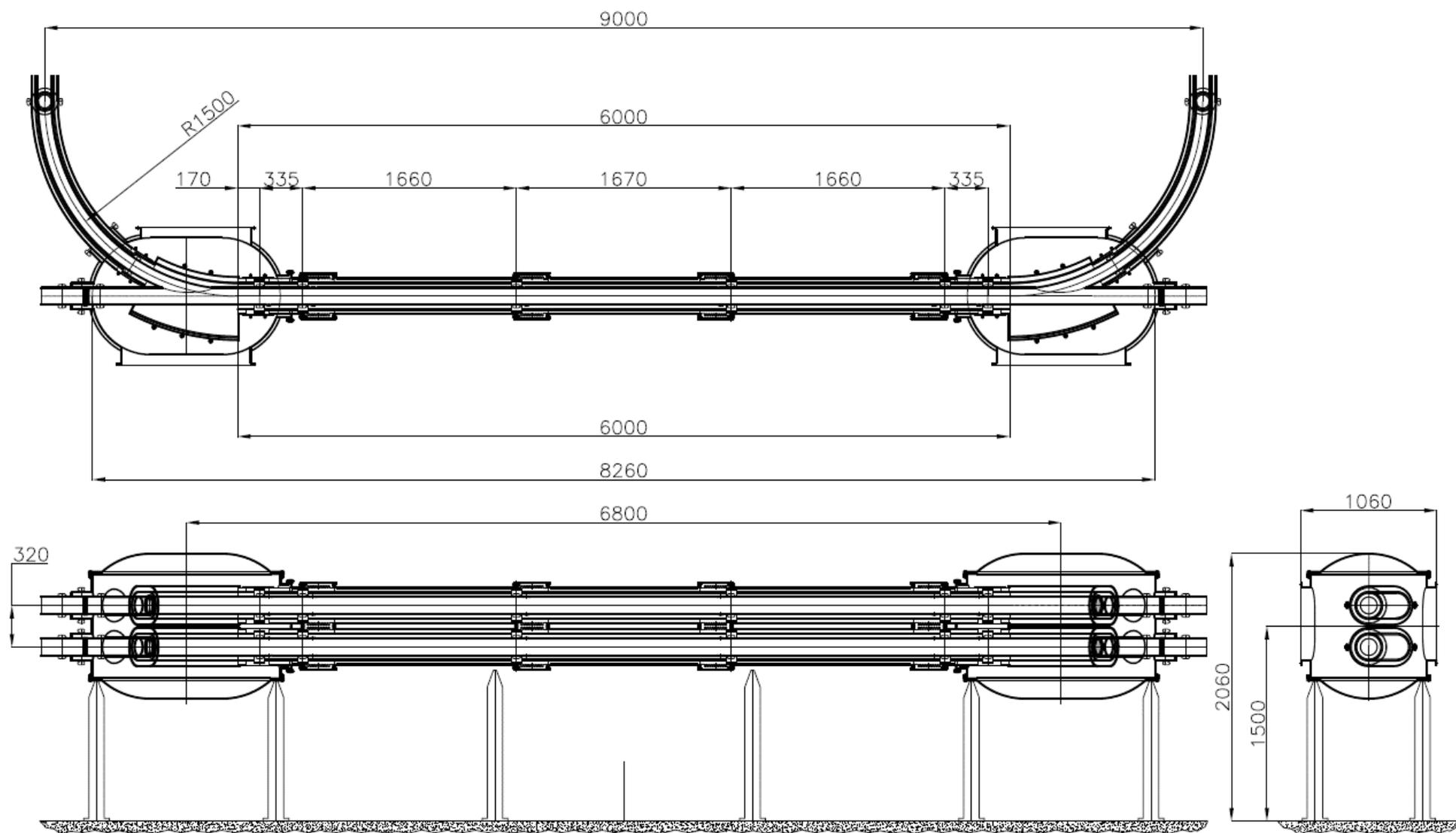


Рисунок 4 – Участок охлаждения. Общий вид (ОИЯИ)

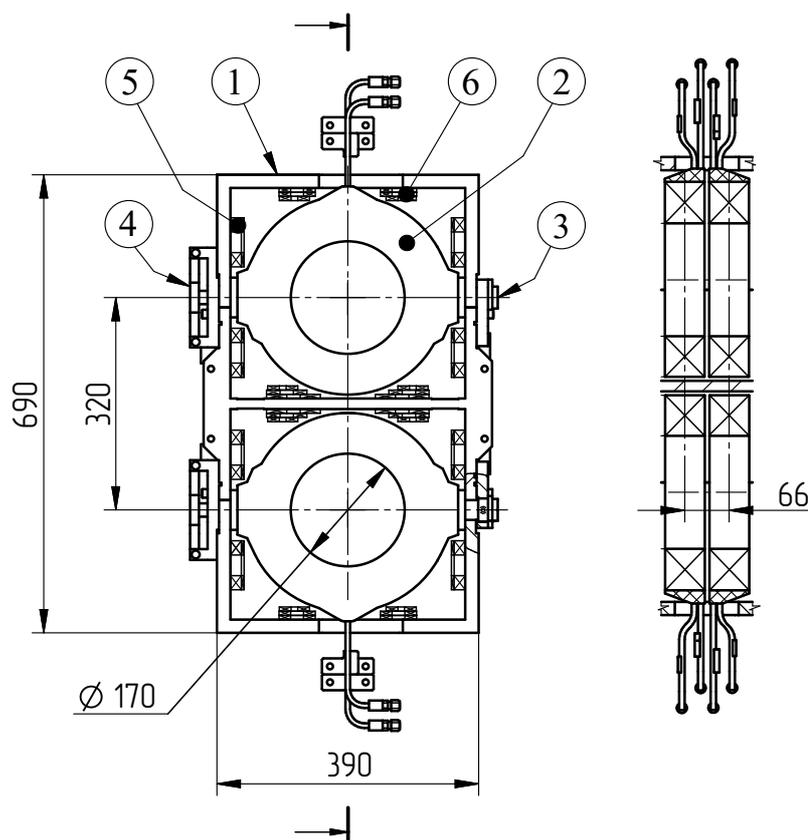


Рисунок 5 – Устройство соленоида охлаждения: 1) корпус (магнитопровод);
 2) основная обмотка; 3) опора основной обмотки; 4) юстировка основной обмотки;
 5) сборки обмоток горизонтальной коррекции; 6) сборки обмоток вертикальной коррекции

Общий вид разработанного соленоида охлаждения представлен на рисунке 6, он состоит из шести «метровых секций»¹ (1) выполненных в виде отдельных (самостоятельных) изделий. Каждая секция имеет возможность независимого подключения к сетям электропитания и гидравлического охлаждения. Все шесть секций соленоида устанавливаются на общем гирдере (3) посредством индивидуальных подставок (2).

Перемещение секций вдоль гирдера обеспечивается применением системы с линейными рельсовыми направляющими HIWIN (Тайвань) серии HG [21]. Для плавного перемещения секций на гирдере предусмотрены винтовые толкатели (4а, рисунок 6). Чтобы исключить возможность перемещения окончательно выставленных секций на гирдере устанавливаются фиксаторы (4б) для каждого подвижного элемента. Винтовые толкатели (4а) выполнены в виде

¹ В собранном виде соленоид охлаждения состоит из шести секций, точная длина которых определяется шагом расстановки обмоток равным 66,5 мм. Число обмоток, размещенных в канале каждой внутренней секции, равно 15, определяет габаритную длину секции в 997,5 мм. При 14 обмотках (для двух крайних секций) длина составит 931 мм. Что позволяет разместить 88 обмоток ведущего поля для каждого канала соленоида. Окончательная длина соленоида охлаждения при этом увеличивается еще и на величину торцевых крышек крайних секций, которая равна 15 мм (длина крайней секции с крышкой равна 946 мм). Таким образом, полная длина соленоида охлаждения «по стали» составляет 5882 мм (рисунок 6). Фотографии секций соленоида охлаждения приведены на рисунках Б.1-Б.3.

отдельного переставного устройства, с возможностью его установки во всех промежуточных положениях (между секциями).

Дополнительно в гирдере (и остальных подставках установки) размещаются кабельные лотки (5, рисунок 6), предназначенные для локального обустройства кабельных сетей цепи электропитания элементов установки и сигнальной цепи диагностических элементов. Окна в боковых и верхней стенках гирдера позволяют обеспечить доступ для прокладки кабельных трасс.

Внутри соленоида размещается теплоизолированная прогревная вакуумная камера (6, рисунок 6), с установленными в ней датчиками положения пучка. Расстояние между камерами соответствует расстоянию между каналами коллайдера и равно 320 мм. Положение медианной плоскости соленоида охлаждения (и всей установки) соответствует таковому у коллайдера и равно 1,5 м (рисунок 4).

Согласующие секции перехода 1-2 кГс (8, рисунок 6) и элементы откачки и диагностики вакуумной системы (9) на рисунке изображены для обстановки (тонкими линиями) и напрямую в состав соленоида (как изделия) не входят. Каналы в полу помещения изображены по результатам геодезических измерений здания (осуществленных ОИЯИ), положение опор гирдера корректировалось по результатам этих измерений. Продольное положение соленоида охлаждения дано относительно проектной оси здания 21з (проектировщик ЗАО «КОМЕТА»).

Разбивка соленоида охлаждения на отдельные короткие секции была выполнена по нескольким причинам, основными из которых можно считать следующие: 1) отсутствие возможности перемещения массивной 6-ти метровой секции в имеющейся конфигурации помещений ускорительного комплекса NICA, особенно при наличии смонтированных элементов магнитной и криогенной систем коллайдера; 2) значительная сложность обеспечения требуемой точности размеров и геометрической точности соленоида охлаждения, необходимых для получения ведущего магнитного поля заданной однородности, так как при увеличении продольного размера конструкции неизбежно увеличиваются геометрические и размерные отклонения, что уже при нормировании значений предельных отклонений размеров (и допусков формы и расположения поверхностей) требует учета значительной величины номинальных значений размеров¹ [22].

¹ Здесь следует принимать во внимание, что соленоид охлаждения состоит из совокупности изделий, получаемых не только механической обработкой, выполняемой при помощи высокоточного оборудования, но и включает в себя изделия, полученные при помощи различных технологических методов: сварки, намотки (например, электрические обмотки соленоида), гибки и других методов. Технологические различия не могут обеспечить одинаковой геометрической точности в изготовленных составных частях изделия. Принимаемые для нормирования размерных отклонений этих частей значения полей допусков (как правило, назначаемые в диапазоне 12-16 квалитетов) только в одном, рассматриваемом интервале размеров (от 5600 до 6300 мм), будут меняться от 4 до 25 мм [22]. А возможности усреднения этих отклонений, за счет комбинирования составных частей, будут исключены.

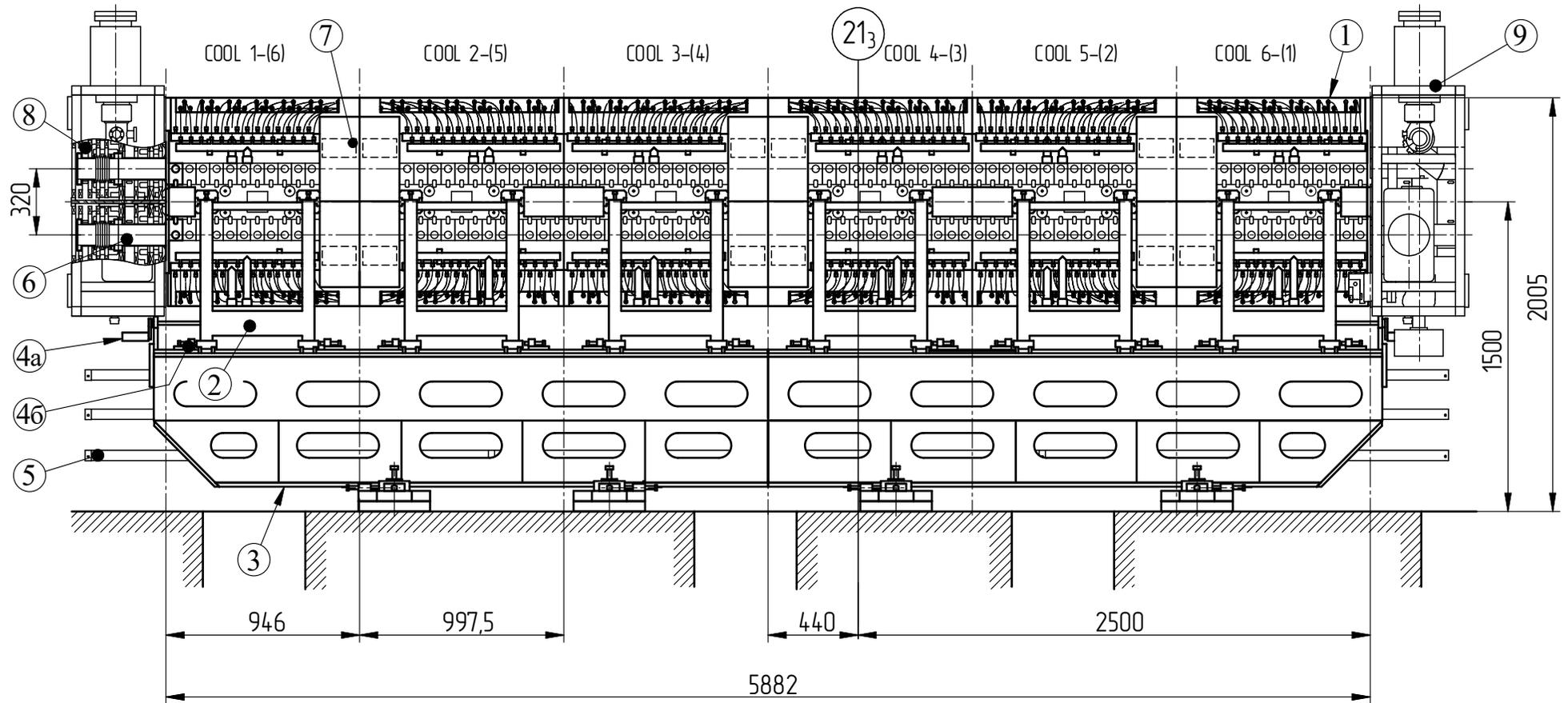


Рисунок 6 – Участок охлаждения. Общий вид.

Значения в круглых скобках «()» соответствуют нижнему каналу СЭО

Так же следует принимать во внимание, что для обеспечения работоспособности механизмов юстировки обмоток ведущего поля соленоида (как это будет показано далее) необходимо иметь достаточно высокую жесткость корпуса. При компоновке соленоида, определенной рисунком 5, в результате значительного увеличения длины соленоида (единой 6-ти метровой конструкции) большое значение будет иметь необходимость обеспечения высокой жесткости корпуса, и будет сопряжено с задачами компенсации деформаций корпуса¹. Дополнительно следует принимать во внимание: температурные деформации протяженных элементов конструкции²; сложность сборки протяженных вакуумных камер³.

В соответствии с принятыми решениями о создании модульной конструкции [23] соленоида охлаждения в 2018 г. был изготовлен физический прототип устройства (одна «метровая» секция с 15-ю основными обмотками, без обмоток коррекции). На прототипе были отработаны вопросы технологической проработки конструкции (часть которых приводится в разделе 1.5 главы 1 диссертации) и были произведены измерения ведущего поля, при токе 200 А было получено поле более 1,5 кГс [24]. Система измерений аналогична применяемой для соленоидов COSY [25].

По основным конструктивным решениям, принятым при проектировании участка охлаждения, был представлен устный доклад на 13-ом международном семинаре памяти В. П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц», состоявшемся с 3 по 8 сентября 2019 г. в г. Алушта), получивший высокую оценку (2-е место в конкурсе докладов молодых ученых), а также была подготовлена публикация [26], в которой были приведены основные внешние ограничения, повлиявшие на конструкцию соленоида, и решения, в некоторых случаях уникальные и ранее не используемые в установках такого типа, показавшие свою оправданность и работоспособность на прототипе секции [24], изготовленном в ИЯФ СО РАН в рамках проекта системы электронного охлаждения коллайдера NICA.

На разработанную оригинальную конструкцию соленоида охлаждения получен патент на изобретение [27].

¹ Например, будет необходимо добиться согласованного расположения каких-то промежуточных опор, которые должны иметь и возможность юстировки и обеспечивать равномерное распределение в корпусе деформаций, возникающих от собственного веса соленоида, что уже является достаточно сложной задачей.

² Например, удлинение обмоток при их нагреве, которое очень хорошо компенсируется в принятой секционированной конструкции соленоида.

³ Если допустить, что изготовить 6-метровый соленоид получилось, то установка вакуумных камер будет требовать либо увеличения свободного пространства для ее задвижки в соленоид (что должно быть учтено в проекте комплекса NICA), либо осуществления монтажа соленоида с уже установленной вакуумной камерой. Второе допущение исключается тем, что такой вариант лишает возможности проведения измерений магнитного поля соленоида при его монтаже (в рабочем положении), следовательно, не позволяет обеспечить достижение необходимой для осуществления электронного охлаждения однородности магнитного поля.

1.1 Конструкция основных обмоток

В общем случае процесс конструирования электрических обмоток различных электромагнитных устройств является много-итерационным процессом, определяемым, с одной стороны, необходимыми параметрами формируемого магнитного поля, с другой стороны, как правило, рядом ограничений: допускаемая в проводнике максимальная плотность тока; внешние геометрические ограничения; номенклатура существующих проводников; технологией изготовления обмоток (в частности, тепловой стойкостью пропитываемых компаундов).

Электронное охлаждение замагниченными электронами требует высокой однородности магнитного поля в продольном (по отношению к движению пучков) направлении. Прямолинейность силовых линий на участке охлаждения прямым образом определяет поперечную составляющую эффективной скорости электронов V_T в сопутствующей системе отсчета. Что особенно важно для охлаждения электронами с высокой энергией, потому что V_T увеличивается прямо пропорционально энергии электронов [25]

$$V_T = \gamma V \theta, \quad (1)$$

где γ – релятивистский фактор; V – продольная скорость электрона; θ – угол отклонения силовой линии поля. Так, например, на установке электронного охлаждения синхротрона COSY (Юлих, Германия), где максимальная энергия электронов ограничивалась 2 МэВ, удалось получить магнитное поле однородность которого составила [28]

$$\Delta B_{\perp}/B = \theta < 10^{-5}. \quad (2)$$

Подобные требования по однородности магнитного поля предъявляются и к системе электронного охлаждения коллайдера NICA при максимальной энергии электронов в 2,5 МэВ.

В ходе экспериментов, проводимых в ИЯФ СО РАН по электронному охлаждению, было показано, что наиболее сильно на искажения поля влияют случайные наклоны соседних витков обмотки [29]

$$\frac{B_{\perp}}{B_0} \cong \frac{h \Delta x}{2R^2} \sqrt{\frac{2R}{h}}, \quad (3)$$

где R – радиус соленоида, h – шаг намотки, $\Delta x/R$ – средний наклон витка. Следовательно, чем меньше радиус соленоида (радиус обмотки), тем большие отклонения силовых линий будут возникать в формируемом ей магнитном поле при неизменных значениях смещений витков.

Конечно, идеальным случаем было бы изготовление сплошной намотки соленоида как, например, в первых работах при изучении электронного охлаждения на накопителе НАП-М, где на участке охлаждения после проведения ряда экспериментов добились кривизны силовых линий лучше, чем 10^{-4} по углу для продольного поля [29]. А следующим шагом (на установке, предназначенной для изучения линейного охлаждения отрицательных ионов водорода) был изготовлен секционированный прецизионный соленоид, позволивший достичь величины искажений силовых линий магнитного поля:

$$\Delta B_{\perp}/B = \theta < 5 \cdot 10^{-5}. \quad (4)$$

Точность изготовления соленоида при этом должна была быть не хуже 0,03 мм. Это потребовало разработки специальной технологии изготовления секций по 0,96 м для соленоида длиной 2,88 м (при протяженности участка охлаждения в 2,4 м), при этом внутренний диаметр соленоида был равен 200 мм. Окончательно, высокого качества поля $4 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ добивались применением 38-и горизонтальных и вертикальных корректоров с поперечным полем (рисунок 7)¹ [30].

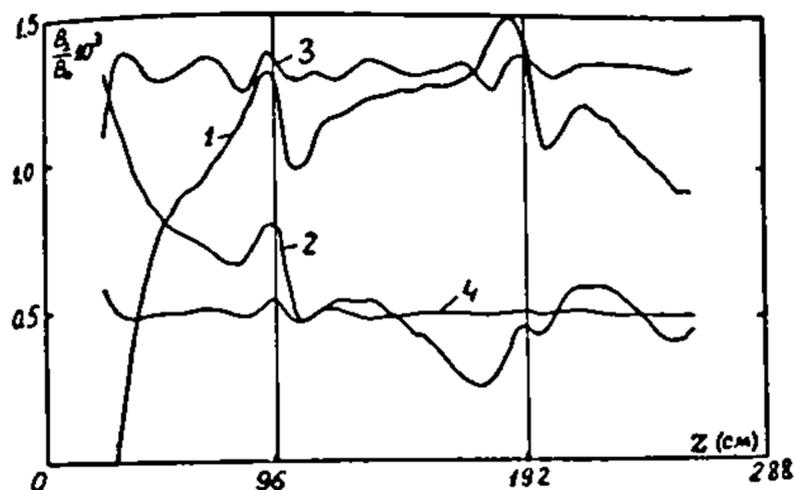


Рисунок 7 – Искажения магнитного поля по горизонтали (1, 3) и вертикали (2, 4) на оси соленоида. Кривые 1, 2 – без включения корректоров; 3, 4 – скорректированное магнитное

$$\text{поле } \sqrt{\langle \frac{B_x^2}{B_0^2} \rangle} = 5 \cdot 10^{-5}; \quad \sqrt{\langle \frac{B_y^2}{B_0^2} \rangle} = 4 \cdot 10^{-5}$$

¹ Эти работы ([30], [31]) хорошо демонстрируют, что даже в гораздо меньших масштабах длины, изготовление сплошной соленоидальной обмотки, которая могла бы обеспечить хорошую однородность магнитного поля, представляет большую технологическую сложность и требует применения специальных конструктивных решений. А при намотке соленоида из формованного проводника необходимо строго удерживать его сечение в заданном положении (предотвращая упругие деформации и сползание витков).

Следует отметить, что сами секции представляли из себя механически обработанную (вырезанную из металла) спираль с напаянной на нее трубкой охлаждения и не были намотаны из проводника (рисунок 8). По подобной технологии, позднее, в Японии был изготовлен соленоид электронного охлаждения накопителя ACR, входящего в накопительный комплекс MUSES (RIKEN, Япония) [31], с длиной соленоида охлаждения равной 3,6 м.

Изготовление сплошной обмотки оправдано, как правило, при относительно небольшой длине соленоидов, и такие установки успешно применяются. Например, соленоид электронного охлаждения антипротонного кольца ELENA (CERN), длина которого равна 1 м [32], или послужившая для него прототипом установка охлаждения накопителя S-LSR (Киото, Япония) [33], [34].

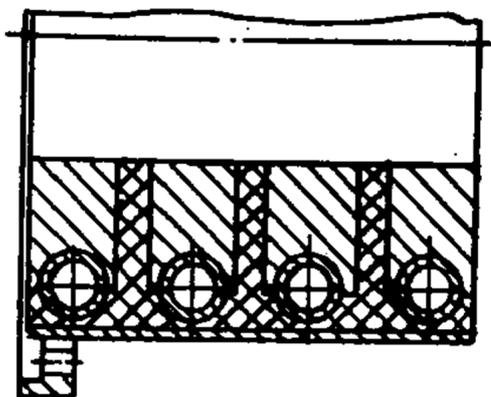


Рисунок 8 – Сечение механически обработанной обмотки

Однако, в ИЯФ СО РАН, начиная с разработанной СЭО синхротрона SIS 18 [35, 36], стали изготавливать соленоиды, собранные из дискретных¹ обмоток, не снижая при этом требований предъявляемых к магнитному полю. Для получения продольного магнитного поля с высокой степенью однородности на СЭО SIS 18 предусматривалась возможность пригонки каждой отдельной обмотки. Требуемой точности добивались именно механической пригонкой, выполняемой по результатам магнитных измерений (механической доработкой сопрягаемых поверхностей обмоток и различными техническими «ухищрениями», такими как расклинка). На следующих установках ЭХ-35 [37] и ЭХ-300 [38] изготовленных для HIRFL-CSR [39] был успешно реализован метод юстировки, основывающийся на наклоне обмотки в вертикальной плоскости и повороте обмотки в горизонтальной плоскости (рисунок 9), где обмотка (1), закрепленная в шаровой опоре (2), смещается при помощи четырех винтов (3), шаг резьбы которых выбирается исходя из требуемого перемещения за один оборот винта. Подробно последовательность проведения измерений и последующей юстировки обмоток изложена в

¹ Имеется в виду способ разбивки протяженной обмотки соленоида на части единичными (дискретными) обмотками, создающими эквивалентное продольное поле такое же, как и при использовании одной протяженной обмотки соленоида.

публикации [40]. Такой способ достижения требуемой высокой однородности ведущего магнитного поля до настоящего времени используется на системах электронного охлаждения разрабатываемых в ИЯФ СО РАН, как и механизмы юстировки, построенные по кинематической схеме, представленной на рисунке 9.

Как упоминалось ранее, соленоид охлаждения коллайдера NICA представляет из себя закрытый короб (рисунок 5), заполненный последовательно соединенными единичными обмотками формирующими ведущее (продольное) магнитное поле. Короб по середине поделен перегородкой разделяющей каналы охлаждения и экранирующей магнитные поля одного соленоида от другого (рисунки 5, 10).

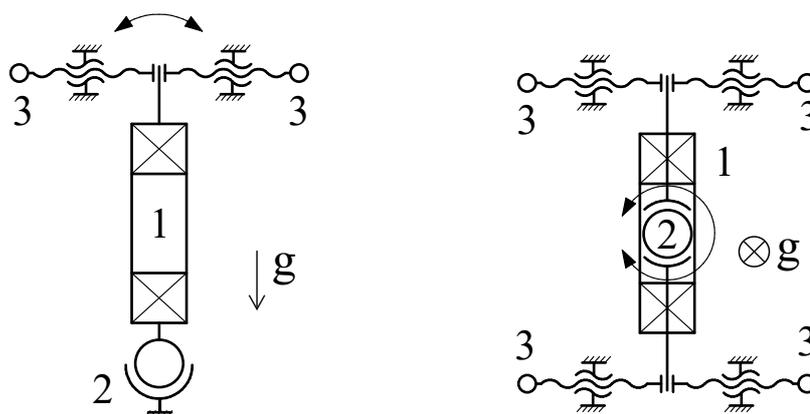


Рисунок 9 – Кинематическая схема механизма юстировки с кинематикой наклона (слева) и поворота (справа) основных обмоток соленоида охлаждения

Так как речь идет об определенном соленоиде (таблица 2), имеющем значительную протяженность в продольном направлении¹, то можно выделить ключевые факторы определяющие геометрические и физические параметры обмоток создающих его продольное поле. Во-первых, это расстояние в 32 см (320 мм) между осями соленоидов (равное расстоянию между осями каналов коллайдера [20], [24]), которое ограничивает геометрию корпуса (рисунок 5) и не позволяет нам увеличивать наружный диаметр обмотки. Во-вторых, это ограничивающие внутренний диаметр обмотки размеры фланцевых соединений вакуумной системы, определяющие возможность установки вакуумных камер в выбранной концепции устройства СЭО коллайдера NICA.

Принимая во внимание эти факторы, определим основные характеристические параметры обмоток. Так, средний радиус витка проводника обмотки, определяемый некоторым исходным сечением (рисунок 10), найдем из выражения:

$$R_{cp} = (R + r) / 2, \quad (5)$$

¹ Длина рассматриваемого соленоида, главным образом, определяется временем протекания самого процесса электронного охлаждения и составляет, без малого, 6 м, что почти в 20 раз больше наружного диаметра обмоток.

где R – внешний радиус обмотки; r – внутренний радиус обмотки.

При $R = 14,75$ см и $r = 8,10$ см из выражения (5) получим значение:

$$R_{\text{cp}} = (14,75 + 8,10) / 2 = 11,43 \text{ (см)}. \quad (6)$$

При этом, максимальное сечение «удобной» квадратной формы¹ (рисунок 10) не может быть более $6,65 \times 6,65$ см² ($V_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$), что позволяет разместить в продольном направлении порядка 80 обмоток на участке в 6 м ($L_{\text{с.о.}}$), с зазором $d = 0,50$ см между обмотками:

$$n_{\text{обм.ср}} = L_{\text{с.о.}} / (V_{\text{сеч}} + d) = 600 \text{ см} / 7,15 \text{ см} = 83,92. \quad (7)$$

Однако, данное число обмоток является сугубо ориентировочным и может быть изменено в любую из сторон (как увеличения, так и уменьшения) исходя из соображений эффективности теплоотвода, технологичности и прочих.

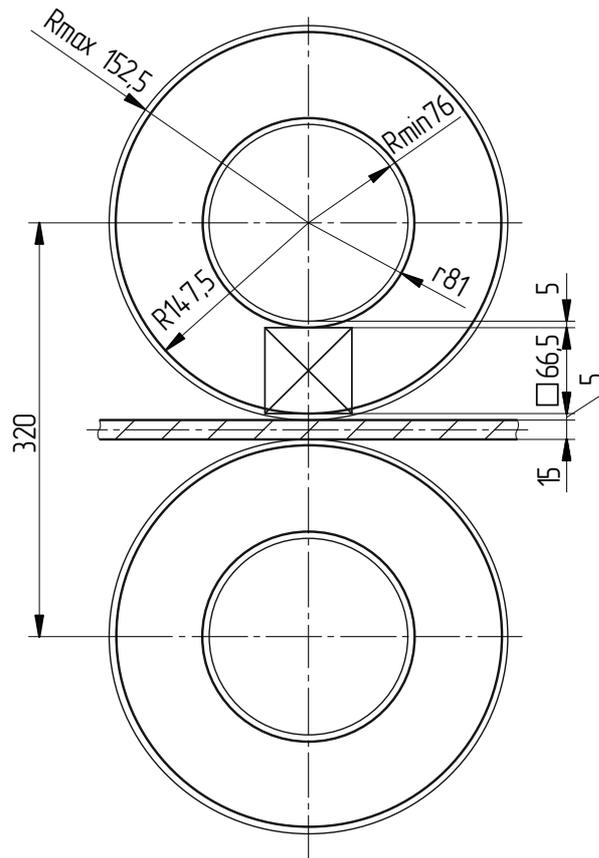


Рисунок 10 – Геометрические ограничения размеров обмоток

¹ Применение квадратного сечения, как правило, более оправдано в отличие от прямоугольной формы обмотки, увеличивающей либо сложность и общую продолжительность юстировки (при большем числе обмоток), либо трудоемкость изготовления обмоток, предъявляя повышенные требования к точности более длинных в осевом направлении обмоток.

Для достижения требуемой на участке охлаждения плотности магнитного потока (поля) $B = 2 \text{ кГс}$ [41], напряженности поля $H = 2000 \text{ Э}$, число ампер-витков соленоида участка охлаждения определяется выражением:

$$H = (4\pi / 10) I \cdot w / l_{CO}, \quad (8)$$

где w – число витков соленоида; I – ток соленоида; l_{CO} – длина соленоида охлаждения.

Преобразовав формулу (8) получим выражение для определения числа ампер-витков соленоида:

$$I \cdot w = 10 \cdot l_{CO} \cdot H / 4\pi, \quad (9)$$

Так, при длине соленоида охлаждения $l_{CO} = 600 \text{ см}$ из выражения (9) получим:

$$I \cdot w = 10 \cdot 600 \cdot 2000 / 4\pi = 954\,930 \text{ (ав)}.^1 \quad (10)$$

Из выражения (10) определим число витков соленоида как:

$$w_H = I \cdot w / I_{CO}. \quad (11)$$

Следовательно, при токе $I_{CO} = 221 \text{ А}$ [41] из выражения (10) получим:

$$w_H = 954\,930 / 221 = 4320. \quad (12)$$

Для исходного сечения ($6,65 \times 6,65 \text{ см}^2$ ($B_{сеч} \times H_{сеч}$)), позволяющего разместить на заданной длине (l_{CO}) усредненное число обмоток $n_{обм.ср} = 84$, определенное выражением (7), найдем ориентировочное число витков в обмотке:

$$w_H / n_{обм.ср} = 4320 / 84 = 51,43. \quad (13)$$

Если в качестве геометрической формы исходного сечения принять квадрат

$$n_{КВ_р} = a_w \cdot a_w = w_H / n_{обм.ср}, \quad (14)$$

то из выражения (14) число витков, размещенных на любой из его сторон, составит:

$$a_w = 48,22^{1/2} = 7,17. \quad (15)$$

Таким образом, ориентируясь на полученные из выражений (13) и (15) значения, можно определить наиболее подходящие (по числу витков) сечения как

¹ Для удобства округлим полученное значение до 950 000 А·виток, данная величина будет ключевым параметром необходимым для обеспечения заданного поля в соленоиде охлаждения.

$$n_{\text{кв}} = 7 \cdot 7 = 49, \quad (16)$$

$$n_{\text{пр}} = 8 \cdot 6 = 48. \quad (17)$$

Для того чтобы избавиться от обратных витков¹ при намотке, число слоев обмотки лучше взять четным, что поможет разместить входящий и выходящий проводники на одной стороне обмотки (рисунок 11). Определенное соотношением (17) сечение обмотки позволяет разместить 8 слоев по 6 витков согласно схеме намотки, изображенной на рисунке 11, где цифрами в горизонтальном направлении обозначены позиции витков обмотки, в вертикальном – позиции слоев намотки, а линия показывает последовательность переходов проводника из одной позиции в другую. В связи с тем, что число витков отличается от числа слоев намотки, в обмотке более целесообразным становится использование формованного проводника с прямоугольным сечением. В нашем случае, прямоугольное сечение проводника позволяет приблизить результирующую форму сечения обмотки к квадратному и компенсировать недостаток продольно расположенных витков всего соленоида на всем участке охлаждения за счет увеличения сечения меди (увеличения тока в проводнике).

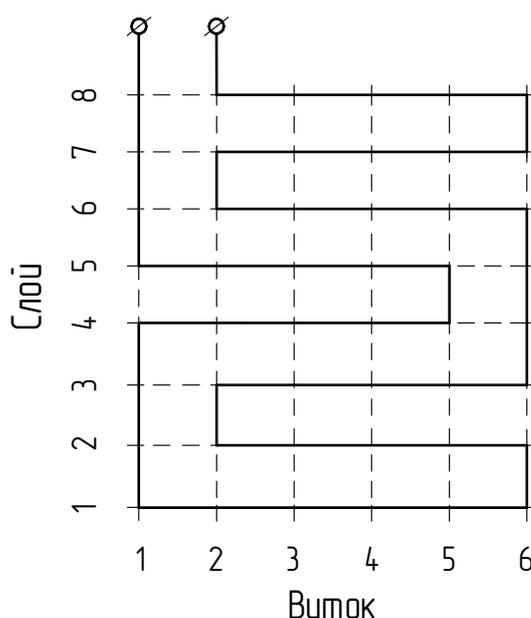


Рисунок 11 – Схема намотки проводника

При таком (итерационном, аналитическом) способе определения числа витков в сечении обмотки, перед тем как приступить к подбору сечений проводника по различным каталогам производителей, необходимо учитывать поправки на толщину изоляции (межвитковой, корпусной и при необходимости межслоевой), а также допуск на отклонение витков при намотке на 1-2%, увеличивающие фактические размеры сечения обмотки.

¹ Как было приведено ранее, обратные витки наиболее сильно влияют на качество продольного поля соленоида.

При секционировании обмотки соленоида¹ необходимо учитывать и возможность обеспечения требуемого температурного режима работы обмотки при проектных параметрах системы гидравлического охлаждения и необходимом электрическом токе питания (определяемом требуемой величиной магнитного поля).

В результате подобрана шинка (проводник), производства Luvata (Финляндия) [42], с размерами 7 x 8 x d3 (мм), которая позволяет добиться плотности тока в 4,58 А/мм², получив при этом близкое к квадрату сечение 61,2x56⁺² мм² (рисунок 12). Дополнительные закладные пластины из стеклотекстолита устанавливаются с целью формирования высокой симметричности расположения витков намотки (не хуже, чем 0,2 мм) и формирования плоских торцевых поверхностей. При таком сечении обмотки каждый канал соленоида позволяет разместить по 90 обмоток ведущего поля суммарной мощностью 64 кВт с шагом в 66 мм (при длине соленоида равной 6015 мм «по стали»)².

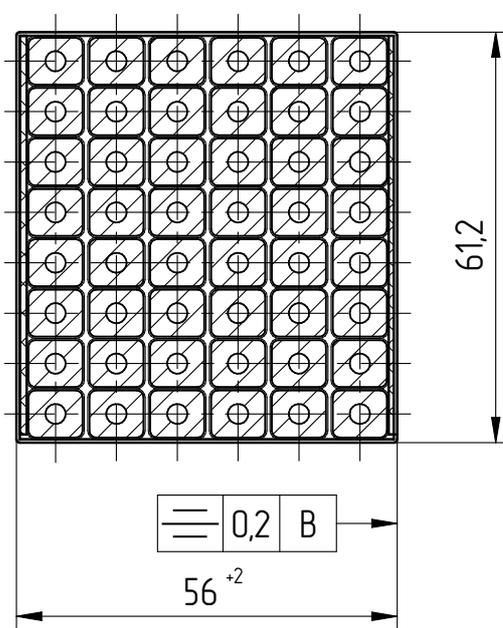


Рисунок 12 – Сечение основной обмотки

При намотке обмоток было реализовано еще одно интересное решение, цель которого заключается в том, чтобы компенсировать поперечные токи на переходах в одном слое обмотки равнозначными переходами в другом слое, что осуществляется за счет смены направления навивки проводника при намотке (рисунок 11 и рисунки 13 г и 13 е). Такая чередующаяся намотка позволила распределить переходы в пределах углов в 120° относительно вертикальной

¹ Имеется в виду разбивка протяженной обмотки соленоида на составную, из отдельных обмоток.

² Как видно из рисунка 6, окончательная длина соленоида охлаждения составляет 5882 мм, при этом он состоит из 88 обмоток в каждом канале. Сокращение длины произошло из-за необходимости получения требуемой характеристики магнитного поля на участке перехода 1-2кГц (рисунок 44), что привело к уменьшению числа обмоток в крайних секциях соленоида охлаждения с 15 до 14 штук в каждом канале.

оси обмотки (рисунок 13 з). Дополнительно, для компенсации поперечных токов, обмотки изготовлены зеркальными (левыми и правыми по направлению намотки) парами, при этом переходы уложены плотно (рисунок 13 а–з) так, что суммарные потери на переходах не превышают половины витка и компенсируются дополнительно уложенными четвертями витков в верхней части обмотки (рисунок 13 и).

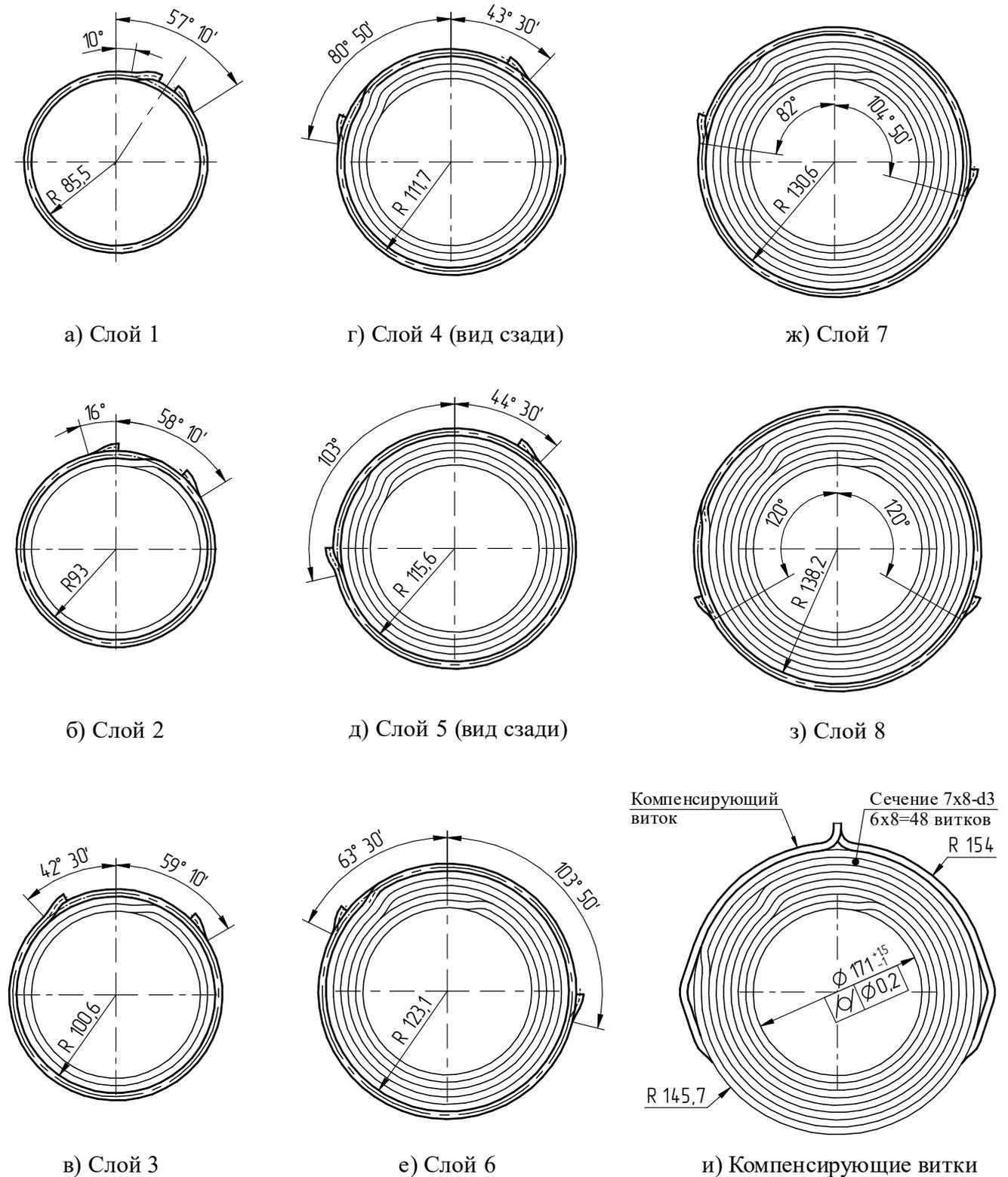


Рисунок 13 – Основная обмотка – схема намотки

Для фиксации формы обмотки и ее электрической изоляции применяется закрытая пропитка под вакуумом и давлением радиационно-стойким¹ эпоксидным компаундом горячего отверждения ЭПК-1 [43]. Цементирующие свойства которого позволяют осуществить последующую механическую обработку конструктивных элементов изделия.

Рассмотрим конструкцию обмотки. Вдоль вертикальной оси симметрии обмотки (перпендикулярно к выводам шинки) устанавливаются заранее собранные и предварительно обработанные закладные элементы, представляющие собой колодку из стеклотекстолита с бронзовыми вкладышами (рисунок 14). Для того чтобы исключить из работы клеевые соединения вкладыши закрепляются в колодках при помощи штифтов из немагнитной коррозионностойкой стали. Предварительная обработка закладных элементов заключается в изготовлении чернового отверстия диаметром 19 мм в бронзовом вкладыше. Припуск на последующую обработку делается небольшим, чтобы, по возможности, уменьшить силу резания, при этом отверстия выставляются с соосностью не хуже 0,1 мм. Так же предварительно выполняются два отверстия «под метчик» для последующей нарезки резьбы М6. Несимметричность до 0,2 мм относительно окна обмотки устанавливается для обеспечения равномерного распределения припуска при последующей обработке торцов закладных элементов. Точности обеспечиваются технологической (пропиточной) оснасткой.

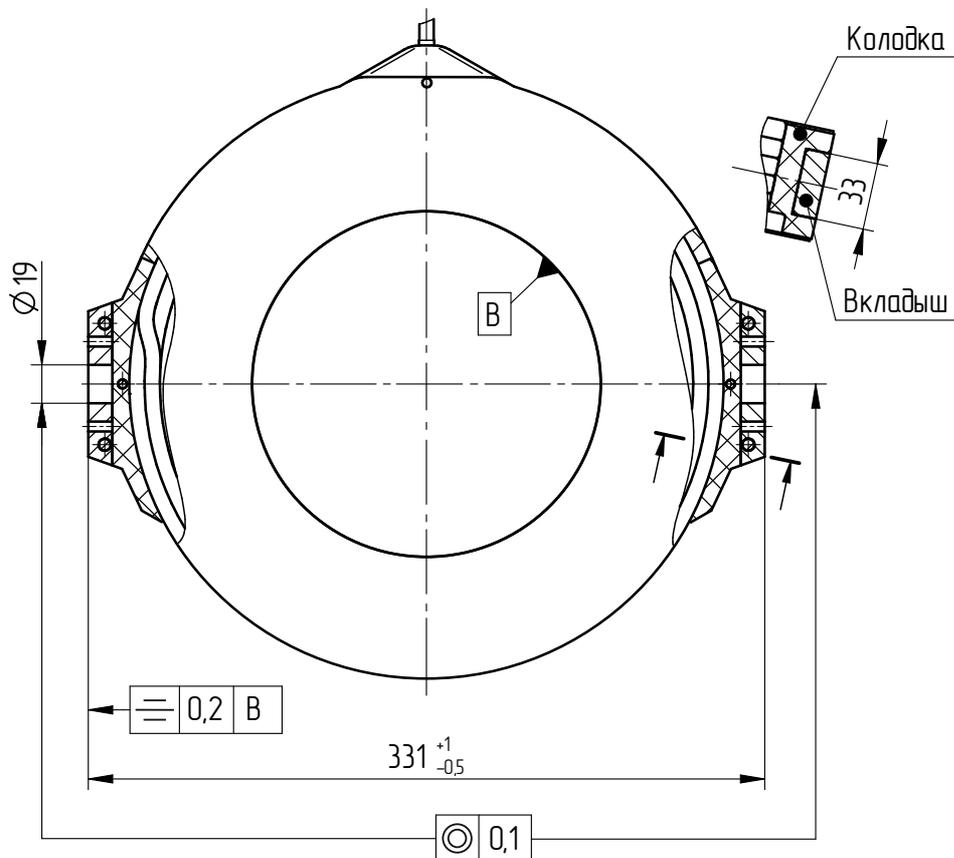


Рисунок 14 – Закладные элементы основной обмотки

¹ Поглощенная доза ионизирующего излучения до значений порядка 50 МГр.

После пропитки и отверждения компаунда обмотка подвергается заключительной обработке: торцевые поверхности обрабатываются до размера $328 \pm 0,2$ мм с несимметричностью не более 0,1 мм относительно окна обмотки и общей непараллельностью не более 0,05 мм; отверстия во вкладышах растачиваются до $\varnothing 20$ G6 (+0,02/+0,01) мм [44] на глубину 8 мм при отклонениях от соосности не более 50 мкм. Далее в эти места устанавливаются полуоси, посредством которых обмотки устанавливаются в корпус соленоида охлаждения. Для центрирования полуосей применяется посадка $\varnothing 20$ G6/h6 (мм) [44].

Чтобы убедиться в том, что такое решение позволяет осуществить обработку вкладыша в закладном элементе обмотки, оценим силу резания, которая возникает при точении. Для оценки будем пользоваться обобщенной методикой [45].

В общем, под силой резания понимают результирующую осевой (P_x), радиальной (P_y), и тангенциальной (P_z) составляющих, каждая из которых определяется прямо пропорционально глубине резания (t), подаче (s) и скорости резания (v), как:

$$P_{x,y,z} = 10C_p \cdot t^x s^y v^n K_p, \text{ (Н)}, \quad (18)$$

где коэффициент C_p и показатели степени x , y , n – величины, зависящие от конкретных условий обработки (вид обработки, обрабатываемый материал и материал режущего инструмента), K_p – поправочный коэффициент. Значения перечисленных величин и параметры режима резания (t -глубина резания, s -подача, v -скорость резания) определяются по справочной литературе [45]. При обработке бронзы (марки БрОЦС 5-5-5, без термообработки) твердостью НВ $10^{-1}=60$ МПа, для определения тангенциальной составляющей¹ P_z , находим:

$$C_p=55; \quad x=1; \quad y=0,66; \quad n=0.$$

Таким образом, приведенная выше, формула (18) принимает вид:

$$P_z = 550 \cdot t \cdot s^{0,66} K_p. \quad (19)$$

При чистовой обработке бронзы рекомендуемые подачи (s) находятся в диапазоне от 0,04 до 0,08 (мм/об), а максимальная глубина резания (t) при чистовой обработке составляет 0,15 мм. Однако, для улучшения геометрической формы обрабатываемой поверхности, при первом проходе рекомендуется устанавливать глубину резания $t = 0,4$ мм, что вполне соответствует тому припуску, который был заложен на чистовую обработку отверстия во вкладыше².

¹ Осевая P_x и радиальная P_y составляющие силы при точении медных сплавов не учитываются.

² В конструкции вкладышей на чистовую обработку после пропитки обмотки заложен припуск величиной 0,5 мм (половина разницы чернового и чистового диаметров отверстий).

Для оценки силы резания подачу берем максимальной ($s = 0,08$ мм/об), из рекомендуемых значений получаем:

$$P_z = 550 \cdot 0,4 \cdot 0,08^{0,66} K_p = 41,54 \cdot K_p, \quad (20)$$

$$K_p = K_{mp} K_{\varphi p} K_{\gamma p} K_{\lambda p} K_{r p}. \quad (21)$$

Значения коэффициентов в выражении (21) определяются в зависимости от обрабатываемого материала (K_{mp}) и геометрических параметров инструмента ($K_{\varphi p}$, $K_{\gamma p}$, $K_{\lambda p}$ и $K_{r p}$). Для медных сплавов с твердостью до НВ $10^{-1} = 120$ МПа принимается коэффициент $K_{mp} = 1$. Некоторое затруднение вызывает определение коэффициентов $K_{\varphi p}$ и $K_{r p}$, связанных с геометрическими параметрами инструмента, которые в одной литературе [45] приведены только для стали и чугуна, однако в другой [46] – одинаковыми для чугуна и медных сплавов и, в целом, не значительно (менее 10 %) отличаются от 1. Таким образом, для оценки тангенциальной составляющей силы резания вполне возможно $K_{\varphi p}$ и $K_{r p}$ принимать равными 1. Наибольшее влияние имеет значение поправочного коэффициента для переднего угла ($K_{\gamma p}$), которое по приведенному графику [46] меняется в диапазоне от 0,85 до 1,15 при углах от -10° до $+10^\circ$; для оценки возьмем его максимальное значение, приняв во внимание, что передний угол для твердосплавных пластин будет скорее равен 0° , что даст значение $K_{\gamma p} = 1$. В итоге, после перемножения всех коэффициентов из выражения (20) получаем максимальную величину тангенциальной составляющей силы резания:

$$P_z = 41,54 \cdot 1,15 = 47,8 \text{ (Н)}. \quad (22)$$

Принимая во внимание то, что согласно приведенным данным [43], предел прочности компаунда ЭПК-1 на растяжение (разрыв) находится в диапазоне значений от 700 до 800 кг/см², усилие, определенное выражением (22), не приводит к разрушению данной конструкции¹.

После технологической проработки конструкторской документации на обмотку некоторые решения, заложенные первоначально, были пересмотрены. Например, отверстия в бронзовом вкладыше стали выполняться без предварительной обработки, выполненной в закладном элементе. Такое решение требует сверления отверстий под полуоси. Для оценки возникающих нагрузок вычислим максимально возможный крутящий момент, получающийся при сверлении отверстия Ø20 мм. По справочнику [45]:

$$M_{кр} = 10C_M \cdot D^q s^y K_p, \text{ (Н·м)}, \quad (23)$$

¹ $P_z = 47,8 \text{ (Н)} / 9,8 \text{ (м/с}^2) = 4,9 \text{ (кгс)}$ уже при учете площади контакта только одной боковой поверхности закладной детали (14,3 см²) не будет вызывать давление превышающие нижнюю границу предела прочности компаунда ЭПК-1 (700 кг/см²) [43].

где коэффициент C_M и показатели степени q , y – величины, зависящие от конкретных условий обработки, $C_M=0,012$; $q=2$; $y=0,8$ [45]; $D = 20$ мм – диаметр сверла; s – подача; K_p – поправочный коэффициент.

При обработке не термообработанной бронзы (БрОЦС 5-5-5) с максимальной подачей $s = 0,76$ мм/об (для сверла из быстрорежущей стали) по формуле (23) определяем:

$$M_{кр} = 0,125 \cdot 20^2 \cdot 0,76^{0,8} K_p = 40,14 \cdot K_p. \quad (24)$$

При этом, фактические условия обработки (коэффициент K_p) при сверлении зависят только от обрабатываемого материала ($K_p = K_{мр}$) [45], ранее мы определили $K_{мр}=1$, для нашего случая (обрабатываемого) материала.

Таким образом, вычисленное из выражения (24) значение величины крутящего момента

$$M_{кр} = 40,14 \text{ (Н·м)}, \quad (25)$$

развиваемое на плече $0,01$ м ($D / 2$), так же не приводит к разрушению конструкции обмотки.

Размеры готовых обмоток проверялись при помощи контрольного шаблона (рисунок 15).

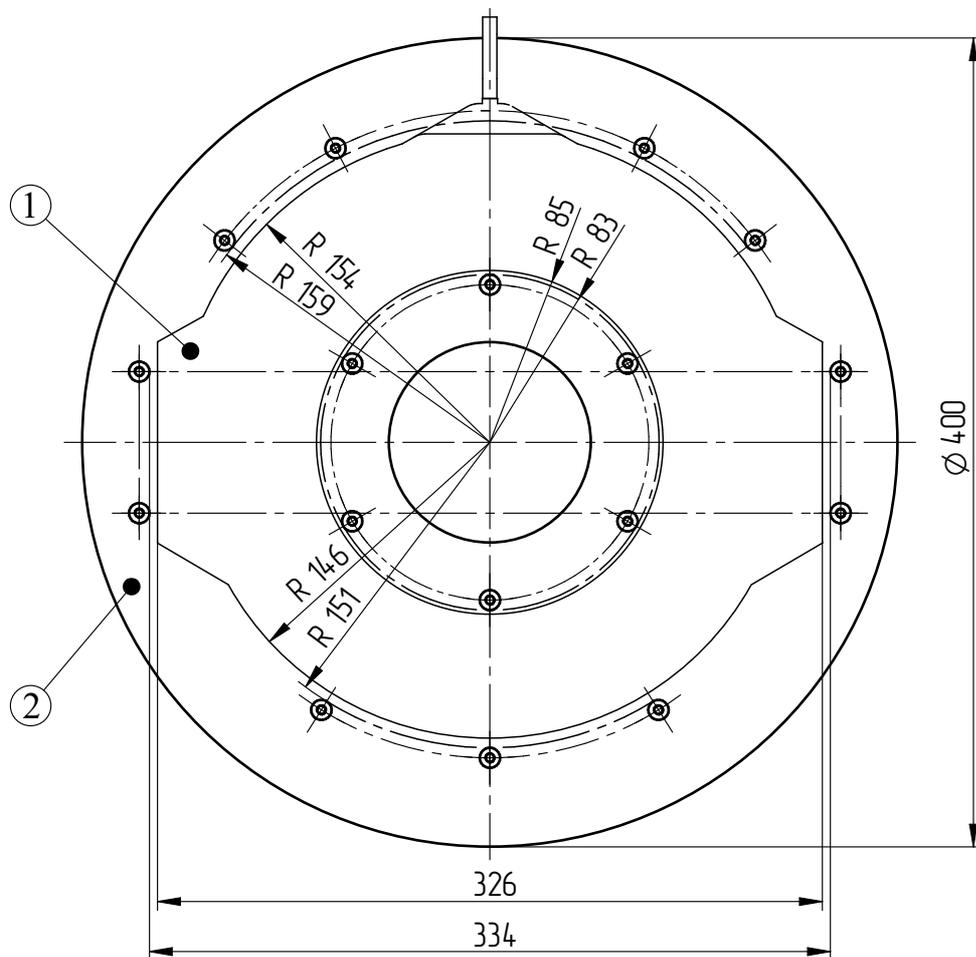


Рисунок 15 – План контрольного шаблона: 1) обмотка; 2) контрольный шаблон

Следует уточнить, что в конструкторской документации особое внимание уделено геометрическим характеристикам основной обмотки соленоида охлаждения. Так, помимо типовых электрогидравлических испытаний, приведенных в СТО [47], в контрольный комплекс были внесены дополнительные требования по измерению геометрии обмоток: параллельности и симметричности торцевых поверхностей вкладышей; соосности базовых отверстий под полюсы и соосности посадочных мест под подшипники (и расстояний по упорным шейкам); расстояния от оси катушки до ее нижней точки; ее внутреннего диаметра и внешнего радиуса. Для проверки которых, при изготовлении пред-серийных образцов обмотки, и был изготовлен контрольный шаблон (рисунок 15), представляющий из себя плиту с установленными на ней калиброванными штифтами (пальцами $\varnothing 10$). По шаблону осуществлялся контроль проходных и не проходных размеров обмоток при помощи втулок, надеваемых на пальцы шаблона, при установленной в него обмотке.

Техническая характеристика основной обмотки, формирующей продольное поле соленоида охлаждения, приведена в таблице 3, а ее общий вид представлен на рисунке 16.

Таблица 3 – Техническая характеристика основной обмотки соленоида охлаждения

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	56 x 61,2
Число витков (виток x слой)	48 (6 x 8)
Размеры сечения шинки, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3
Длина намотки шинки, $L_{\text{ш}}$, м	35,5
Габаритные размеры, $L_{\text{сеч}} \times V_{\text{обм}} \times H_{\text{вывод}}$, мм	56 x 448 ¹ x 480
Вес, кг	18
Сопротивление (20°C), мОм	12,7
Рассеиваемая мощность, Вт	645
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5\text{K}$), л/мин	0,74
Падение давления охладителя, бар	7,3
Ток питания, А	220

Уточненные тепло-гидравлические расчеты обмотки выполнены автоматизированным способом по методике изложенной в СТО [47], применяемой в научно-конструкторском отделе

¹ Без учета габаритной величины полюсов ширина обмотки составляет 328 мм (рисунок 16).

ИЯФ СО РАН при проектировании водоохлаждаемых обмоток теплых магнитов¹, составленной на основании справочных данных [48].

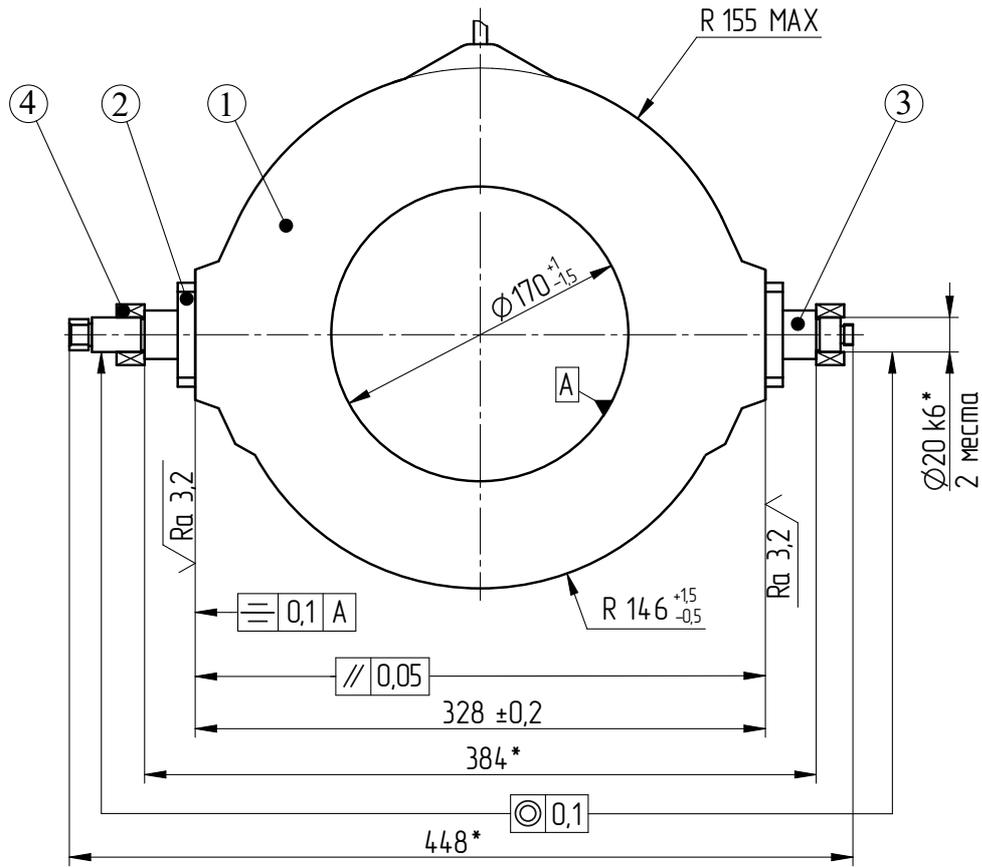


Рисунок 16 – Основная обмотка соленоида охлаждения:

- 1) обмотка после пропитки; 2) полуось юстировочного узла;
3) полуось опоры; 4) подшипник; *размеры, получаемые в деталях

Обмотки, применяемые в транспортных и согласующих соленоидах, представляют из себя значительно более простые изделия², которые не настолько требовательны к геометрии намотки и не требуют дополнительной юстировки в корпусах соленоидов. Для их установки, главным образом, используются закладные элементы из стеклотекстолита, а фиксация осуществляется винтами, либо скобами (например, в согласующих секциях) непосредственно к направляющим. Бронзовые вкладыши, на опорных элементах обмоток, используются в случаях если требуется производить перемещение обмоток для сборки или доступа к вакуумным

¹ Следует отметить, что при расчете, во внимание берутся не только гидравлические потери, связанные с геометрией охлаждающего канала и типом течения, но и изменение вязкости жидкости от ее температуры.

² Наиболее оригинальную с геометрической точки зрения конструкцию, среди применяемых в установке обмоток, имеют обмотки поворотного поля, располагаемые в тороидах (глава 2, раздел 2.2). Геометрическая форма которых выполнена в виде криволинейной трапеции, образованной двумя concentрическими окружностями в секторе 90° . Их намотка производится на каркас из стеклотекстолита, в котором также установлены корректирующие обмотки, намотанные из сплошного проводника прямоугольного сечения марки ПСДТ.

камерам (например, в обмотках соленоидов с отсекающими шиберами (главы 3, раздел 3.3) или обмотках тороида (глава 2, раздел 2.2)). Такие конструктивные решения в общем виде будут рассматриваться в разделах, посвященных отдельным элементам системы электронного охлаждения.

С точки зрения геометрической формы, применяемых в установке водоохлаждаемых обмоток, можно выделить обмотки тороида (глава 2, раздел 2.2), имеющие прямоугольную форму, обусловленную, главным образом, конструкцией вакуумной камеры тороидов (в которой необходимо организовать совмещение электронного и ионного пучков частиц). Однако, кроме геометрической формы, данные обмотки не имеют существенных технических отличий от обмоток устанавливаемых в других соленоидах, предназначенных для транспортировки электронного пучка.

1.2 Юстировка основных обмоток

Механизм юстировки обмоток ведущего поля соленоида охлаждения организован по принципу наклон-поворот, о котором говорилось в предыдущей части диссертации, и где была приведена его кинематическая схема (рисунок 9). Однако, геометрические ограничения конструкции соленоида охлаждения, разрабатываемой для коллайдера, не позволяли реализовать данную схему в виду значительного ограничения места под опору в верхнем канале соленоида. Это потребовало применения новой кинематической схемы юстировки обмоток (рисунок 17). Как показано на рисунке 10, зазор между стенкой корпуса соленоида и внешним радиусом обмотки составляет всего около 5 мм (без поправок на допуски формы обмотки и отклонений ее действительных размеров). Зазор такой величины, в первую очередь, не позволяет разместить ни сферический подшипник, ни полусферическую опору. Во вторую, необходимо учитывать, что конструкция соленоида должна обеспечить возможность

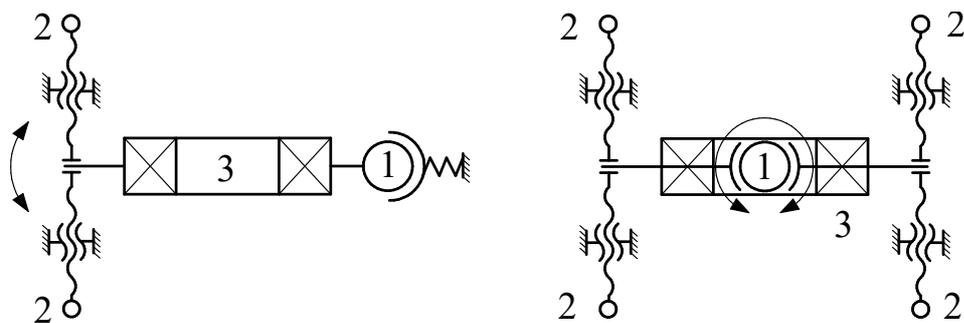


Рисунок 17 – Кинематическая схема механизма горизонтальной юстировки (слева) и наклона (справа) основных обмоток

независимого доступа к обеим вакуумным камерам (для верхнего и нижнего каналов коллайдера). Эти факторы выражаются в желательном применении симметричной конструкции устройства (обеспечивающей максимально одинаковые принципы организации каждого канала, в том числе и доступа к его внутренним частям). Но симметричная конструкция соленоида, в нашем случае, делает невозможным использование опорной полусферы обмотки в том виде, как это представлено на рисунках 9 и 18¹, и не позволяет обеспечить одинаковую функциональность таких опор в верхнем и нижнем каналах установки (в рабочем положении соленоида). Дело в том, что действующая на изделие сила тяжести, в данном случае, будет нагружать лишь опору верхнего канала, а опора нижнего канала будет работать как подвес (сила тяжести будет ее разгружать).

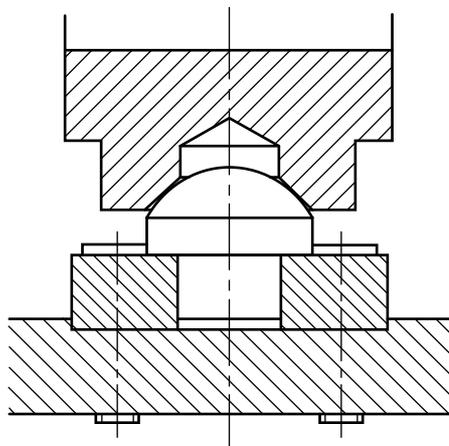


Рисунок 18 – Вариант конструкции опоры юстируемых обмоток

Новая кинематика юстировочных узлов позволяет добиться одинакового функционирования опор обмоток при работе в положении, исключающем работу силы тяжести при нагружении опор. В этом решении ось юстировки повернута на 90° относительно оси обмотки, обмотка (3, рисунок 17), закрепленная в шаровой опоре (1), смещается при помощи четырех прецизионных микрометрических винтов с резьбой М6х0,5 (мм) (2). Использование резьбы с мелким шагом позволяет обеспечить точность регулировки в 10 мрад на один оборот винта.

Особое внимание следует обратить на конструкции опор обмоток. Для юстировки в СЭО с одним каналом охлаждения применяется схема, приведенная на рисунке 9, где, как было замечено ранее, опора, располагающаяся в нижней части обмотки, нагружается весом обмотки. Подвижность обмотки обеспечивается конструкцией опоры, показанной на рисунке 18, где опорные полусферы диаметром порядка 30 мм закрепляются на корпусе соленоида, и на них опираются обмотки соленоида при помощи закладных элементов, имеющих внутреннюю

¹ В конструкции не предусмотрены специальные зажимные устройства, которые могли бы позволить ей работать в перевернутом положении.

коническую поверхность (формируется сферический подшипник). При использовании такого варианта конструкции опоры сила тяжести способствует устранению зазоров в опоре, и тем самым обеспечивает нормальную работу механизма юстировки обмоток.

В случае, если ось юстировки повернута на 90° , сила тяжести перестает создавать рабочую нагрузку в опоре, необходимую для исключения люфтов в зазорах сферического подшипника и хороший (равномерный) контакт поверхностей не обеспечивается. В связи с чем был разработан новый пружинный узел предварительного натяжения, задача которого исключить влияние веса обмотки на образование люфтов в опоре. Принципиально новая конструкция опоры показана на рисунке 19 и состоит из: сферического подшипника (2), установленного в обойму (стакан) (5) и закрепленного на полуоси обмотки соленоида (1). Нагружение подшипника (2) осуществляется при помощи узла натяжения с тарельчатой пружиной (3), действующего через шарик (4). Составные части опорного узла закрепляются в корпусе (6), который устанавливается на корпусе соленоида (7). Метка на рисунке 19 показывает центр подшипника (вершину угла наклона). В общей компоновке СЭО опорный узел обмоток ведущего поля располагается с внешней стороны установки (соленоида охлаждения).

Дополнительно в примененной конструкции предусмотрена возможность юстировки обмотки вдоль оси вращения, что позволяет, в случае необходимости, компенсировать смещение центра обмотки от оси соленоида. Юстировка обеспечивается резьбой, выполненной на внешней поверхности обоймы (5, рисунок 19).

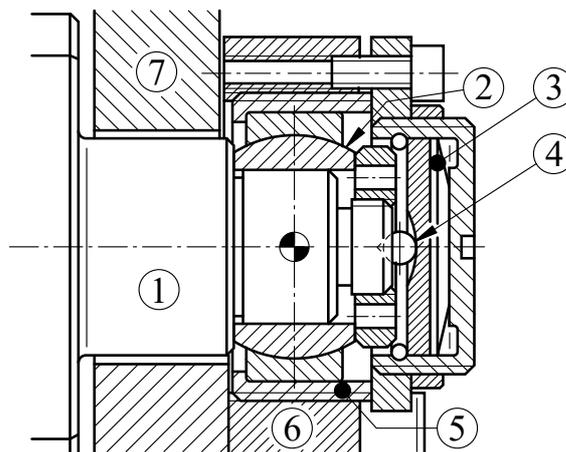


Рисунок 19 – Устройство опоры с пружинным узлом

С внутренней стороны (по общей компоновке системы) на соленоиде охлаждения размещаются юстировочные узлы, изображенные на рисунке 20, устроенные следующим образом: водило (3), закрепленное на полуоси обмотки (1) при помощи скобы, перемещается микрометрическими винтами (2), которые блокируются зажимными винтами после окончательной юстировки. Корпусные части юстировочных узлов (4) крепятся к корпусу

секций соленоида и предварительно позиционируются при помощи ключей (5). Площадки под установку ключей выполняются в корпусах секций соленоида охлаждения в соответствии с шагом расстановки обмоток (такие же ключи используются для позиционирования опор обмоток). Дополнительно в корпусе юстировочного узла устанавливается второй сферический подшипник, задача которого – компенсация различных перекосов (как вызванных геометрическими отклонениями полюсей обмотки (допусками формы, рисунок 16), так и возникающих при юстировке обмотки). Метка на рисунке 20 обозначает центр вращения обмотки, плоскость наклона обмотки перпендикулярна продольной оси водила (3).

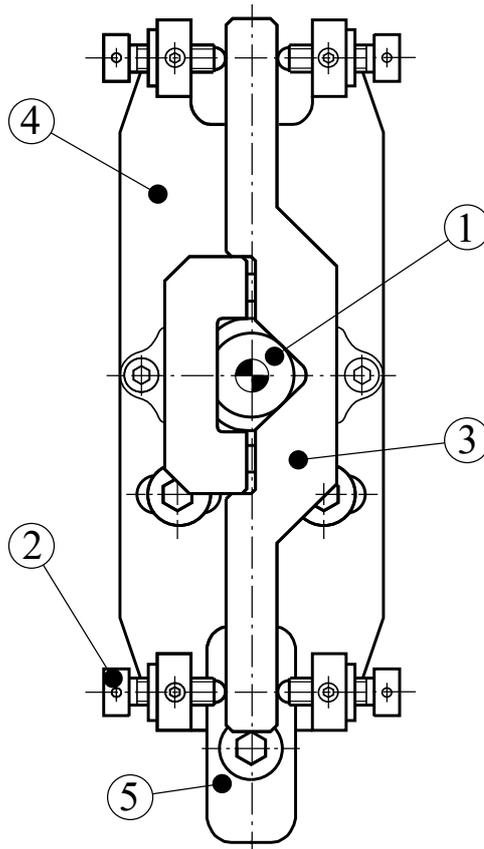


Рисунок 20 – Юстировочный узел

Такая «повернутая» конструкция юстировочного узла, с учетом размеров основных обмоток соленоида и шага их расположения, позволяет добиться диапазонов регулирования не менее ± 10 мрад для наклона обмоток и около ± 20 мрад для их поворота при использовании половины продольного зазора между соседними обмотками¹.

Для прецизионных перемещений в юстировочном узле используются микрометрические винты, расположенные на расстоянии 66,5 мм от оси вращения обмотки (метка центра на рисунке 20) и около 430 мм от опоры с пружинным узлом (метка на рисунке 19). Такое

¹ Другими словами, приведенные значения являются минимальными величинами смещений в диапазоне регулирования, для случая, когда перемещение двух соседних обмоток производится во встречном направлении.

расположение позволяет добиться точности в 1 мрад/оборот винта при наклоне и 7 мрад/оборот при повороте обмоток.

Реализованные конструктивные решения юстировочного узла, в некотором роде уникальные и ранее не используемые в установках такого типа, показали свою работоспособность, подтвержденную результатами измерения ведущего магнитного поля на прототипе секции центрального соленоида [24], изготовленной в ИЯФ СО РАН в рамках проекта системы электронного охлаждения коллайдера NICA.

После испытаний прототипа секции соленоида охлаждения некоторые элементы конструкции юстировочного узла были доработаны: механизм юстировки обмоток получил контрящие винты; был изменен материал ¹ и добавлена термообработка контактных плоскостей водила, однако, каких-либо существенных изменений узел юстировки не получил.

Конструкция юстировочного узла, использованного на прототипе секции охлаждения, была представлена в стендовом докладе на конференции по электронному охлаждению и связанным темам “COOL 2019, Workshop on Beam Cooling and Related Topics (12th)”, состоявшейся с 23 по 27 Сентября 2019г. в ИЯФ СО РАН, и публикации [49].

1.3 Сборки обмоток коррекции

Помимо задачи получения продольного (ведущего) поля высокой однородности на участке охлаждения, необходимо иметь и возможности коррекции положения электронного пучка в поперечном направлении (чтобы добиться не только его устойчивого движения, но и совместить электронный и ионный пучки), а также подправлять его форму. Для этого в конструкциях секций (рисунок 5) на вертикальных (левая и правая) и горизонтальных (верхняя и нижняя) стенках размещаются сборки обмоток коррекции (рисунки 21, 22 и 23). Эти сборки формируют поперечные (горизонтальное и вертикальное) магнитные поля, необходимые для управления положением электронного пучка. Корректоры питаются от отдельного (независимого) источника. Общая схема расположения корректоров формы и положения пучка в магнитных элементах СЭО приведена в главе 5.

¹ При юстировке обмотки на прототипе было обнаружено, что шарики микровинтов упираясь в водило, выполненное из нержавеющей стали (12X18H10T), легко деформируют его даже при малых усилиях подтяжки винтов, что обусловлено низкой твердостью материала водила. Такие деформации нежелательны в механизме юстировки, где требуется высокая точность и повторяемость позиционирования обмоток. Поэтому для серийного изготовления водила была применена качественная конструкционная среднеуглеродистая сталь марки 45.

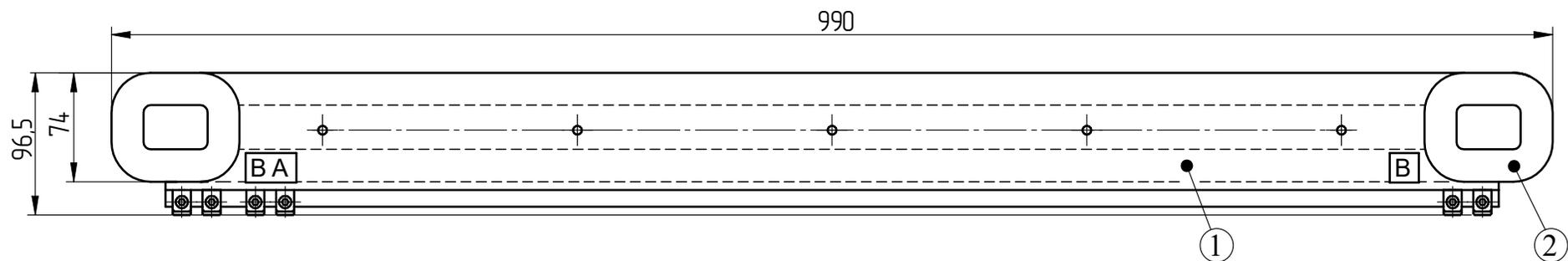


Рисунок 21 – Корректор горизонтального поля «В-А-В»:
 1) основная обмотка «1А»; 2) компенсирующая обмотка «1В»

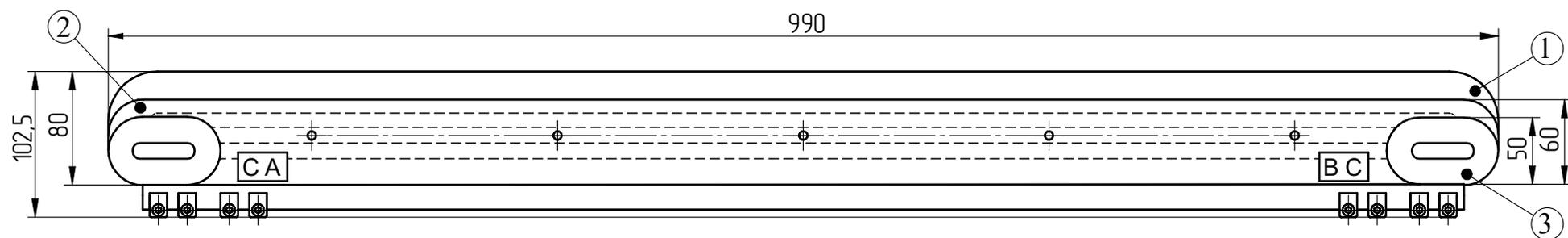


Рисунок 22 – Корректор вертикального поля «С-А-В-С»:
 1) основная обмотка «2А»; 2) основная обмотка «2В»; 3) компенсирующая обмотка «2С»

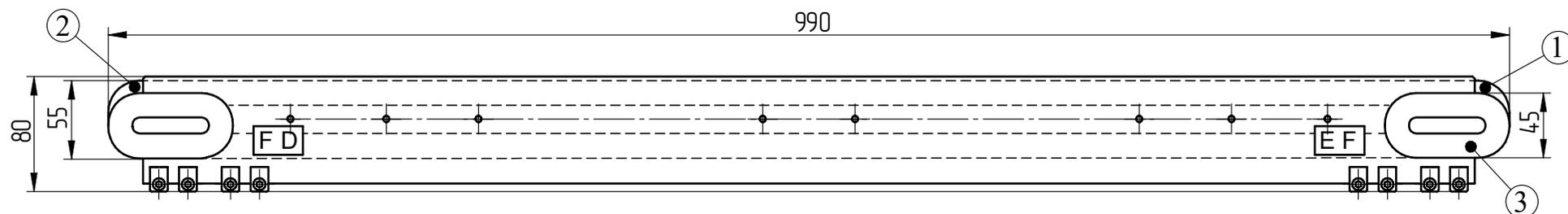


Рисунок 23 – Корректор вертикального поля «F-D-E-F»:
 1) основная обмотка «2D»; 2) основная обмотка «2E»; 3) компенсирующая обмотка «2F»

Результаты, полученные при численном моделировании магнитных полей (рисунок 24), были использованы в качестве исходных геометрических данных для конструирования. Передача электронных геометрических моделей (ЭГМ) осуществлялась посредством экспорта из расчетного ПО «MAG 3D» (ИЯФ СО РАН) в конструкторскую систему проектирования посредством формата обмена (DXF (Autodesk)). Расчетные результаты после предварительной обработки использовались в качестве эскизной геометрии конструкторских (2D, 3D) моделей. В процессе подготовки они, в основном, очищались от избыточной геометрии (удалялась триангуляционная разбивка, удалялись символьные обозначения и координатные оси, удалялись аппроксимации силовых линий поля и любые данные не относящиеся к геометрии контуров обмоток коррекции), проверялось соответствие коэффициентов масштабирования геометрических моделей (необходимость масштабирования вызвана особенностями экспорта видовой области с геометрическими данными из расчетного ПО).

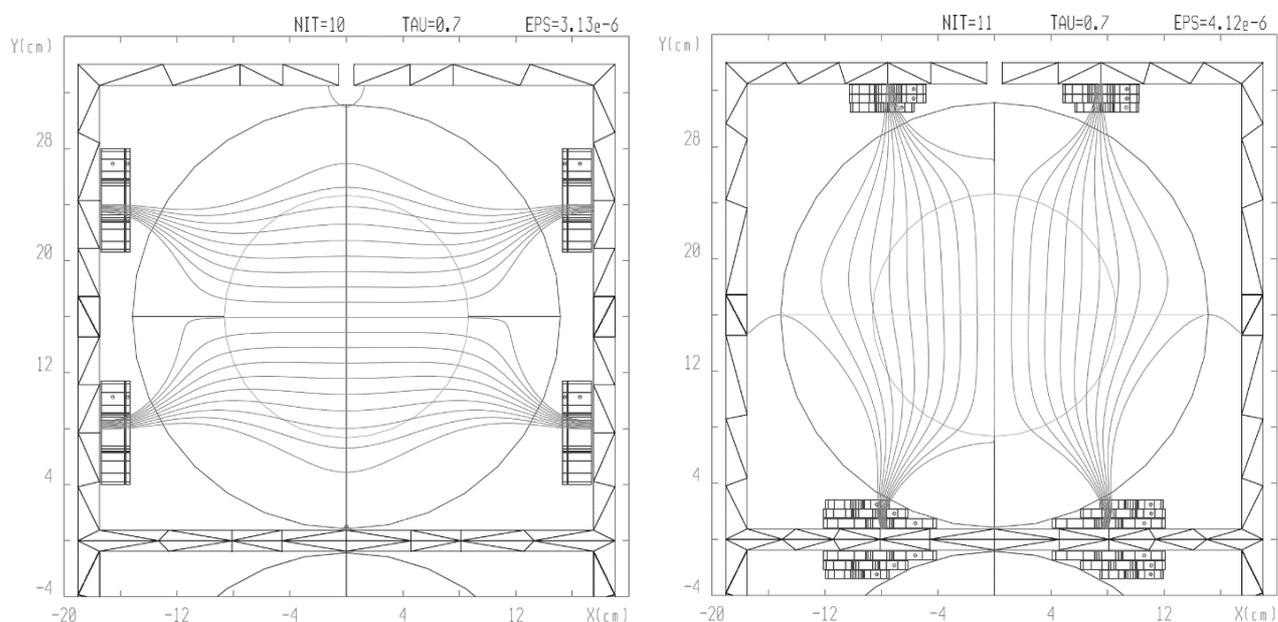


Рисунок 24 – Расчет горизонтального (слева) и вертикального (справа) поля коррекции, ПО «MAG 3D» (ИЯФ СО РАН)

Сборки горизонтальных корректирующих обмоток, изображенные на рисунке 21, можно сказать, получились обычными. Они изготавливаются в двух типоразмерах (исполнениях): первое исполнение устанавливается в средних секциях соленоида охлаждения; второе – в его крайних секциях и будет более подробно рассмотрено позднее. Технические характеристики обмоток корректора¹ приведены в таблице 4. Дополнительные (маленькие) обмотки «1В» (или «1С»), размещенные по краям основной обмотки «1А» (или «1D»), необходимы для компенсации провалов поля на стыках секций соленоида охлаждения.

¹ Варианты сборки коррекции горизонтального поля «В-А-В» и «С-D-С» отличаются только положением клемм обмоток (снизу у сборки «В-А-В», как изображено на рисунке 22, и сверху у «С-D-С»).

Таблица 4 – Техническая характеристика обмоток корректора
горизонтального поля «В-А-В» и «С-Д-С»

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	Обмотка 1А	Обмотка 1В
Форма сечения обмотки	прямоугольная	
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	22 x 15,6	22 x 3,11
Число витков (виток x слой)	90 (18 x 5)	18 (18 x 1)
Марки проводника	ПСДТ	
Сечение проводника, $I_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)	
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	181,6	3,8
Габаритные размеры ¹ , В x L x H, мм	74 x 990 x 15,6	74 x 90 x 4,8
Сопротивление (20°C), Ом	1,297	0,027
Рассеиваемая мощность, Вт	46,7	0,97
Ток питания, А	6,0	6,0
Номер позиции (рисунок 21)	1	2

Каждая обмотка сборки выводится на отдельные группы клемм (например: «С-Д-С» или «В-А-В» – рисунок 21). Обмотки корректоров с горизонтальным полем располагаются на вертикальных стенках секций корпуса соленоида охлаждения с внутренней стороны, обмотки – парные (рисунки 5 и 24).

Более вычурный вид имеют сборки обмоток коррекции (рисунки 22 и 23), формирующие вертикальное поле. Что обусловлено, с одной стороны, недостатком свободного места (достаточного для размещения обмоток прямоугольного сечения), а с другой стороны – отсутствием центральной симметрии корпуса соленоида охлаждения. Так, из-за горизонтальной асимметрии соленоида сборки обмоток коррекции получились попарно отличающимися между собой (верхние и нижние пары, рисунок 24 (справа)), а недостаток свободного места определил их ступенчатое сечение (вписанное в имеющиеся малые зазоры).

Расположенная на средней стенке корпуса секции соленоида охлаждения сборка коррекции горизонтального поля «С-А-В-С» изображена на рисунке 23. Она представляет собой изделие из четырех обмоток трех различных типов: две маленьких обмотки «2С» и по одной обмотке «2А» и «2В». Технические характеристики обмоток приведены в таблице 5. Сборки «С-А-В-С» работают в паре с корректорами «F-D-E-F» (рисунок 24), расположенными на крышке корпуса секции соленоида охлаждения (рисунки 5 и 21). В нем используются обмотки «2D», «2E»² и «2F» с технической характеристикой, приведенной в таблице 6.

¹ В сборе корректор имеет габаритные размеры 96,5 x 990 x 22,5 ($B_{\text{сб}} \times L_A \times H_{\text{сб}}$, мм).

² Обмотки «2D» и «2E» имеют одинаковые характеристики и отличаются только расположением выводов.

Таблица 5 – Техническая характеристика обмоток корректора вертикального поля «С-А-В-С»

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ		
	Обмотка 2А	Обмотка 2В	Обмотка 2С
Форма сечения обмотки	прямоугольная		
Размеры сечения по изоляции, $L_{сеч} \times H_{сеч}$, мм	29,3 x 6,2	19,5 x 6,2	17,1 x 6,2
Число витков (виток x слой)	48 (24 x 2)	32 (16 x 2)	28 (14 x 2)
Марки проводника	ПСДТ		
Сечение проводника, $l_{п} \times h_{п}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)		
Длина намотки проводника, $L_{п}$, м	97,1	64,2	4,4
Габаритные размеры ¹ , В x L x Н, мм	80 x 990 x 6,2	60 x 990 x 6,2	45 x 80 x 6,2
Сопротивление (20°C), Ом	0,694	0,459	0,031
Рассеиваемая мощность, Вт	25,0	16,5	1,1
Ток питания, А	6,0	6,0	6,0
Номер позиции (рисунок 22)	1	2	3

Таблица 6 – Техническая характеристика обмоток корректора вертикального поля «F-D-E-F»

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	Обмотка 2Е (2D)	Обмотка 2F ²
Форма сечения обмотки	прямоугольная	
Размеры сечения по изоляции, $L_{сеч} \times H_{сеч}$, мм	17,1 x 6,2	17,1 x 6,2
Число витков (виток x слой)	28 (14 x 2)	28 (14 x 2)
Марки проводника	ПСДТ	
Сечение проводника, $l_{п} \times h_{п}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)	
Длина намотки проводника, $L_{п}$, м	57,0	4,9
Габаритные размеры ³ , В x L x Н, мм	55 x 990 x 6,2	45 x 80 x 6,2
Сопротивление (20°C), Ом	0,407	0,035
Рассеиваемая мощность, Вт	14,6	1,3
Ток питания, А	6,0	6,0
Номер позиции (рисунок 23)	1 (2)	3

Кроме сборок коррекции (четырёх внутренних секций соленоида охлаждения (рисунки 21, 22 и 23) составляющих корректоры формы и положения пучка «Р-Corr» (глава 5), в соленоиде охлаждения используются отличающиеся от них сборки коррекции (рисунки 25 и 26) со ступенчатой обмоткой линейного поля («L+P-Corr», глава 5).

¹ В сборе корректор имеет габаритные размеры 102,5 x 90 x 20 ($B_{сб} \times L_A \times H_{сб}$, мм).

² Размещенные на краях сборки дополнительные (маленькие) обмотки «2F» имеют такие же параметры, как обмотки «2С» корректора «С-А-В-С» (таблица 5), немного отличаясь от них расположением выводов.

³ В сборе корректор имеет габаритные размеры 80 x 990 x 20 ($B_{сб} \times L_D \times H_{сб}$, мм).

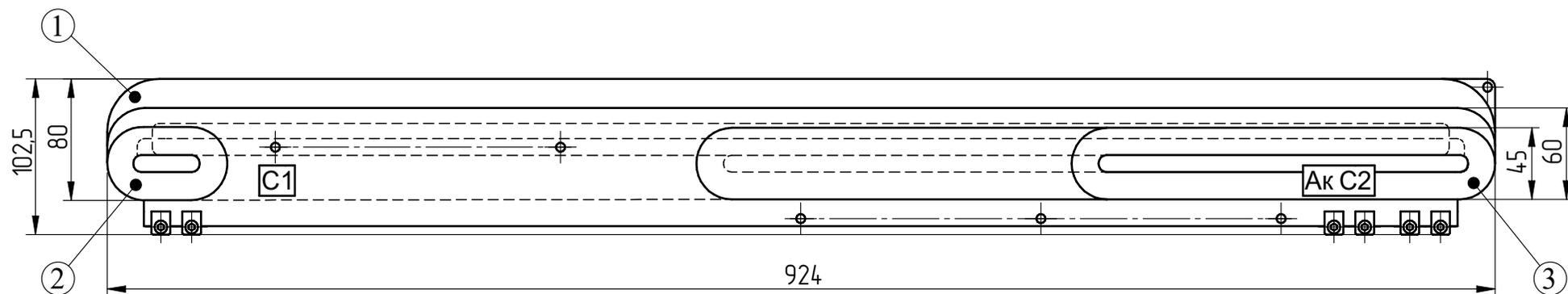


Рисунок 25 – Корректор вертикального поля крайних секции «С1-Ак-С2»:

1) основная обмотка «Ак»; 2) компенсирующая обмотка «С1»; 3) обмотка линейного поля «С2»

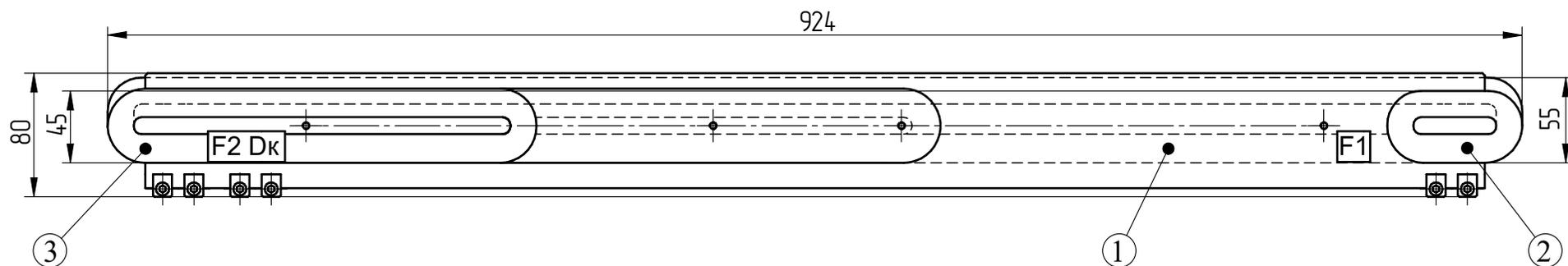


Рисунок 26 – Корректор вертикального поля крайних секции «F1-Дк-F2»:

1) основная обмотка «Дк»; 2) компенсирующая обмотка «F1»; 3) обмотка линейного поля «F2»

Они применяются в крайних секциях соленоида охлаждения и имеют различные конфигурации. Например, для горизонтальных корректоров, вводится лишь второй типоразмер большей обмотки (аналогичной обмотке 1А, таблица 4) с длиной равной 924,5 мм¹; в то время как для вертикальных корректоров крайних секций добавляются ступенчатые обмотки линейного поля («С2» таблица 7 и «F2» таблица 8) и уменьшается габаритная длина их сборок. Еще одним конструктивным изменением, отличающим вертикальные корректоры крайних секций, можно считать то, что основные обмотки (в каждой из сборок) последовательно соединяются при помощи пайки (перед пропиткой сборки) и выводятся на общий разъем («Ак» и «Дк», рисунки 25 и 26), образуя единую основную обмотку.

Техническая характеристика обмоток сборки «С1-Ак-С2» (рисунок 25), расположенного на средней стенке корпуса секции соленоида, приведена в таблице 7. Данный корректор состоит из трех различных обмоток.

Таблица 7 – Техническая характеристика обмоток корректора вертикального поля «С1-Ак-С2»

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ		
	Обмотка Ак	Обмотка С2	Обмотка С1 ²
Форма сечения обмотки	ступенчатое		прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, L _{сеч} x H _{сеч} , мм	29,3 x 6,2 и 19,5 x 6,2 ³	17,1 x 3,1 x 2 слоя ⁴	17,1 x 6,2
Число витков (виток x слой)	80 ⁵	28 (14 x 2)	28 (14 x 2)
Марки проводника	ПСДТ		
Сечение проводника, l _п x h _п (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)		
Длина намотки проводника, L _п , м	150,6	22,8	4,4
Габаритные размеры ⁶ , В x L x Н, мм	80 x 920 x 12,4	45 x 530 x 6,2	45 x 80 x 6,2
Сопротивление (20°C), Ом	1,076	0,163	0,031
Рассеиваемая мощность, Вт	38,7	5,7	1,1
Ток питания, А	6,0	6,0	6,0
Номер позиции (рисунок 25)	1	3	2

¹ Изменение длины обмотки вызывает изменение ее сопротивления до 1,212 Ом (20°C) при длине проводника 169,6 м и, соответственно, рассеиваемой мощности до 43,6 Вт. Остальные параметры данного корректора из-за изменения длины данной обмотки не меняются.

² Дополнительная (маленькая) обмотка «С1» идентична обмотке «С2» корректора «С-А-В-С» (таблица 5).

³ Ступенчатое сечение формируется изменением числа витков в слоях намотки: 2 слоя по 24 витка и 2 слоя по 16 витков, при постоянной габаритной длине намотки 920 мм.

⁴ Ступенчатое сечение формируется изменением длины намотки проводника в каждом слое: 530 мм – длина намотки первого слоя, 280 мм – длина намотки второго слоя, при постоянном числе витков в слое, следовательно – постоянной габаритной ширине намотки 45 мм (рисунок 25).

⁵ В сборе корректор имеет габаритные размеры 96,5 x 990 x 22,5 (В_{сб} x L_А x H_{сб}, мм).

⁶ В сборе корректор имеет габаритные размеры 102,5 x 924,5 x 20 (В_{сб} x L_{сб} x H_{сб}, мм).

Техническая характеристика обмоток сборки «F1-Dк-F2» (рисунок 26), расположенного на крышке корпуса секции соленоида, приведена в таблице 8. Данный корректор, также, состоит из трех различных обмоток.

Таблица 8 – Техническая характеристика обмоток корректора вертикального поля «F1-Dк-F2»

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ		
	Обмотка Dк	Обмотка F1 ¹	Обмотка F2
Форма сечения обмотки	прямоугольная	прямоугольная	ступенчатое
Размеры сечения по изоляции, L _{сеч} x H _{сеч} , мм	16x12,4	17,1 x 6,2	17,1 x 3,1 x 2 слоя ²
Число витков (виток x слой)	56 (14 x 2)	28 (14 x 2)	28 (14 x 2)
Марки проводника	ПСДТ		
Сечение проводника, l _п x h _п (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)		
Длина намотки проводника, L _п , м	106,5	4,9	23,0
Габаритные размеры ³ , B x L x H, мм	55 x 920 x 12,4	45 x 80 x 6,2	45 x 542 x 6,2
Сопротивление (20°C), Ом	0,760	0,035	0,164
Рассеиваемая мощность, Вт	27,4	1,3	5,9
Ток питания, А	6,0	6,0	6,0
Номер позиции (рисунок 26)	1	2	3

Все обмотки корректоров наматываются на немагнитных сердечниках ⁴, которые необходимы для увеличения теплоотвода от обмоток в корпус соленоида. Однозначность позиционирования сердечников в процессе сборки корректоров обеспечивается при помощи штифтов из материала такой же марки, установленных в заранее выполненные отверстия сердечников. Обмотки, с припаянными к ним контактными площадками, помещаются в тонкий корпус из стеклотекстолита и пропитываются эпоксидным компаундом горячего отверждения. После пропитки в сборках выполняются отверстия для присоединения обмоток к корпусам секций соленоидов и производятся типовые испытания: межвитковой и корпусной изоляции (в том числе в условиях повышенной влажности) и контролируются сопротивления обмоток.

Другие варианты сборок ⁵ корректоров формы и положения электронного пучка будут приводится в контексте конструкций транспортных и согласующих соленоидов (в соответствующих главах диссертации), а общее описание и схема их расположения – в главе 5.

¹ Дополнительная (маленькая) обмотка «F1» идентична обмотке «2С» корректора «С-А-В-С» (таблица 5).

² Ступенчатое сечение формируется изменением длины намотки проводника в каждом слое: 542 мм – длина намотки первого слоя, 280 мм – длина намотки второго слоя, при постоянном числе витков в слое, следовательно – постоянной габаритной ширине намотки 45 мм (рисунок 26).

³ В сборе корректор имеет габаритные размеры 80 x 924 x 20 (B_{сб} x L_{сб} x H_{сб}, мм).

⁴ В качестве немагнитного материала обладающего высокой теплопроводностью для изготовления сердечников обмоток и штифтов в данных конструкциях используется сплав Д16Т.

⁵ В общем, представляющие собой более простые изделия, содержащие не более двух разных обмоток.

1.4 Корпус соленоида охлаждения

Приведенная на рисунке 5 компоновка соленоида охлаждения геометрически определяет корпус (магнитопровод) его секции, выполненный в виде закрытого короба из качественной конструкционной стали (Сталь 20). Корпус предназначается для размещения в нем основных обмоток, формирующих продольное магнитное поле, и сборок обмоток коррекции (горизонтального и вертикального корректоров), что связано с необходимостью организации и сопутствующего размещения: различных креплений, цепей питания, контуров охлаждения, устройств защиты и других вспомогательных элементов. Корпусом определяется не только возможность получения высокой точности расстановки обмоток, что непосредственно влияет на однородность продольного магнитного поля, но и возможность экранирования продольных полей в каждом из каналов соленоида.

Для обеспечения возможности сборки, корпус секции (рисунок 27) конструктивно делится на Н-образное основание (отдельно приведенное на рисунке 28), выполненное в виде двутавровой конструкции и две П-образные крышки. Причем обмотки ведущего поля крепятся именно к основанию корпуса, что делает возможным переворот корпуса с установленными обмотками соленоида даже при снятых крышках. Такой способ крепления обмоток позволяет производить снятие крышек корпуса (в случае необходимости) без влияния на элементы крепления и юстировки обмоток.

Корпуса секций изготавливаются в двух конструктивных исполнениях, отличающихся длиной (определяемой числом обмоток 14 либо 15) равной: 997,5 мм у внутренних секций, 946 мм у крайних секций (в которых установлены торцевые крышки соленоида охлаждения).

Одной из задач, определяющих высокие эксплуатационные характеристик устройства, является возможность многократной его разборки и сборки, не приводящих к изменению точностей, полученных при первоначальной сборке. Для точной выставки крышек по отношению к основанию секции применяются установленные на нем (основании) ловители (рисунок 27).

С целью упрощения складского хранения готовых корпусов на промежуточных стадиях производственного цикла гайки крайних шпилек заменяются ножками с внутренней резьбой такой же размерности. Для такелажных операций применяются поворотные грузовые петли («RUD» [50] серии VLBG 0,9t M10), рассчитанные на полный вес секции (с обмотками и всем оборудованием).

Для уменьшения неоднородностей магнитного поля на стыках секций (чтобы обеспечить хорошее примыкание торцевых поверхностей корпусов соседних секций) к длине основания и

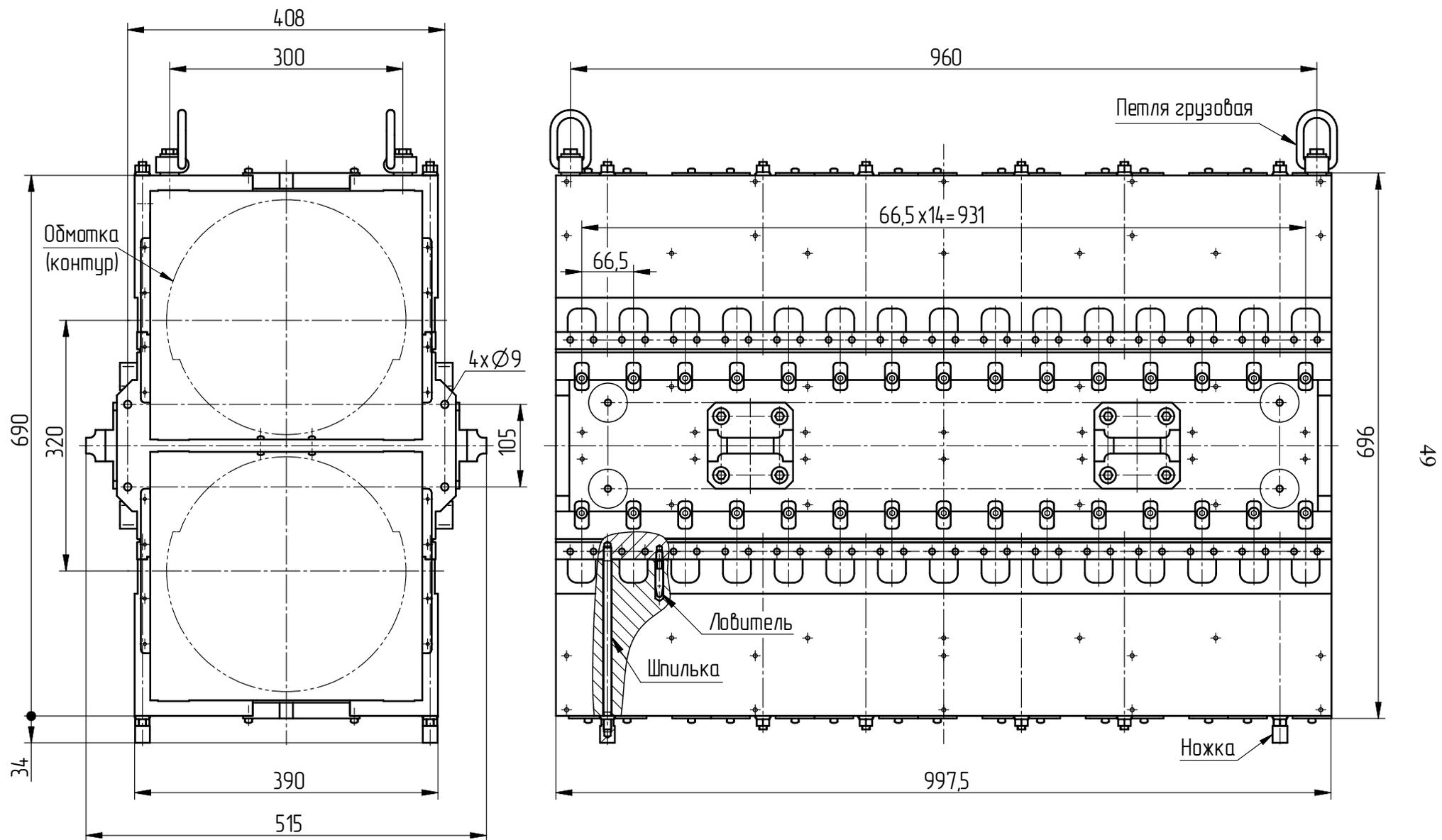


Рисунок 27 – Корпус внутренней секции соленоида охлаждения

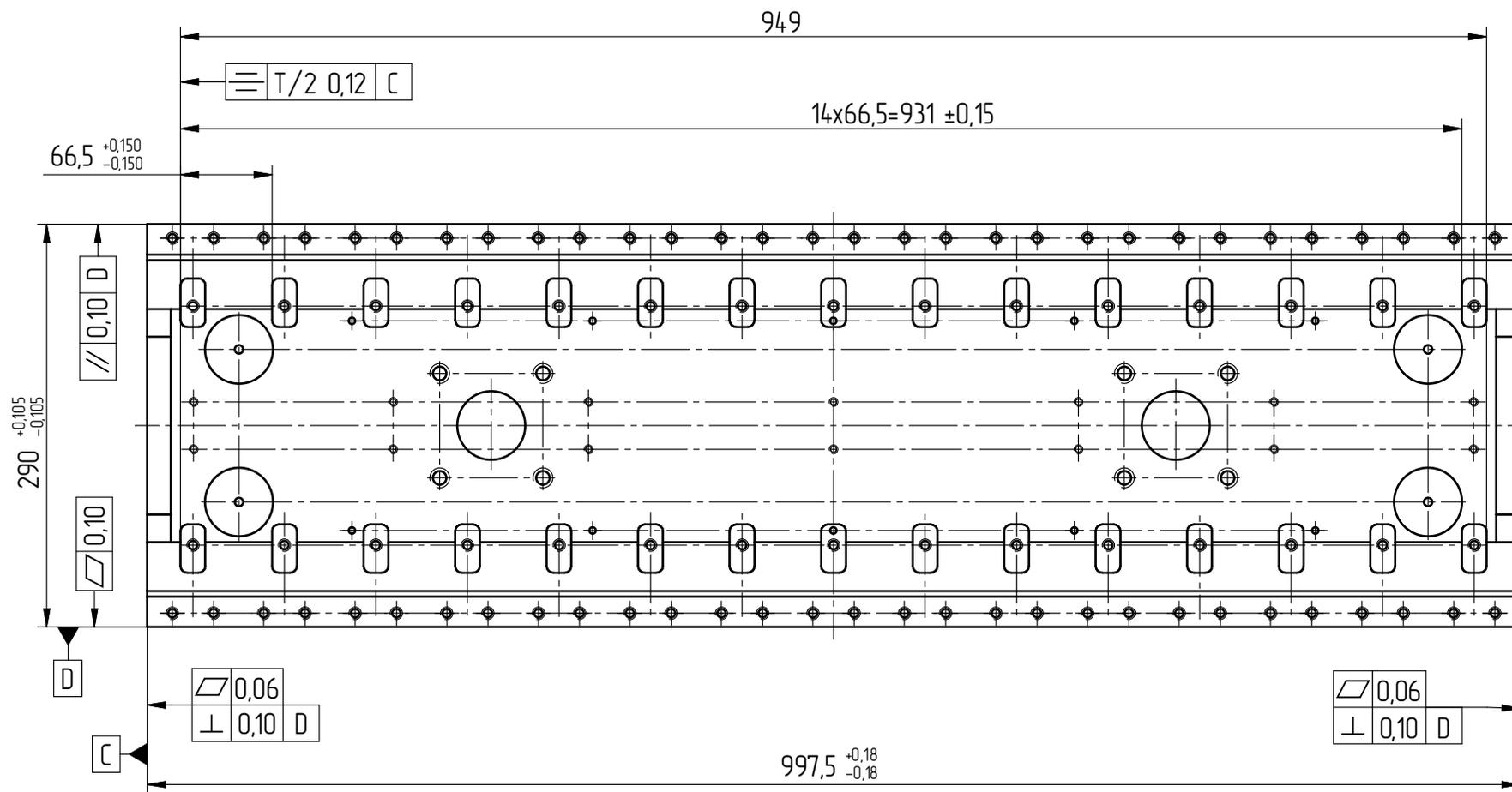


Рисунок 28 – Размеры базовых поверхностей основания секции

базовым поверхностям, определяющим положение осей обмоток¹ ведущего поля, устанавливаются стандартизированные требования по 10 качеству [44] (рисунок 28). Они определяют допуски расположения поверхностей и предельные отклонения линейных размеров². Не характерное для охватываемых размеров симметричное поле допуска (*js*), связанное с длиной корпусов секций и межосевым расстоянием каналов, задается с целью получения симметричных отклонений в обе стороны относительно номинальных значений и уменьшения возможного сложения ошибок³.

Допуски расположения конструктивных элементов площадок крепления юстировочных (опорных) узлов секций соленоида, приведенные на рисунке 29, так же задаются симметричными, а в качестве базовых поверхностей берется ширина пазов ключей 18 G10 (мм).

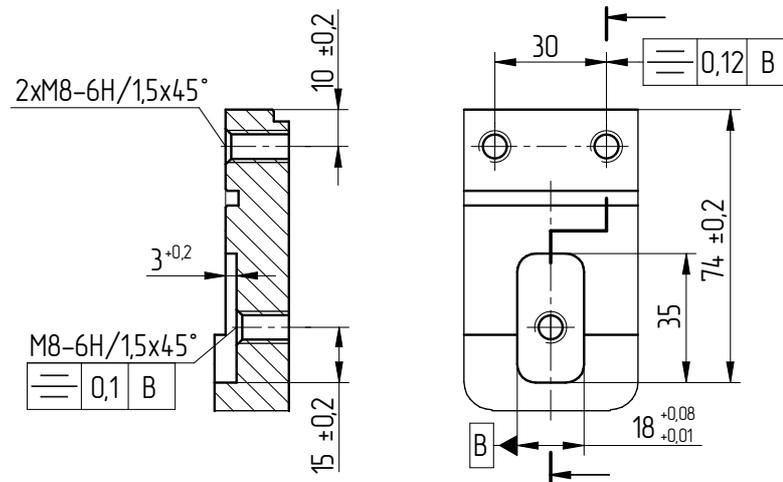


Рисунок 29 – Площадка крепления юстировочного узла

Положение базовых площадок для установки ключей, задающих продольный шаг (66,5 мм) между юстировочными узлами обмоток (рисунок 28), заданы симметрично расположенными относительно фактической длины секций (база «С»), по 7..8 степени точности для всей группы⁴. При этом нормируемое отклонение шага расположения базовых площадок составляет не более $\pm 0,15$ мм между двумя любыми базовыми площадками ключей (шпонок)⁵.

¹ Расстояние между центрами обмоток верхнего и нижнего каналов.

² Длина корпусов средних секций составляет 997,5 js10 (мм), высота основания 290 js10 (мм). Длина корпусов крайних секций 931 js10 (мм), при той же высоте основания.

³ Предельные отклонения одного знака (не симметричное поле допуска) при стыковке секций будут приводить к набеганию (складыванию) их величин. В случае, когда отклонения имеют разные знаки, суммарные значения длины, как ожидается, усредняются в большей степени. Так как длина секций связана не с сопряжением вал/отверстие, а с шагом расстановки обмоток, то такое назначение допуска на размер более оправдано для обеспечения лучшего усреднения шага расстановки обмоток.

⁴ На габаритной длине расположения пазов, составляющей 949 мм, устанавливается требование не симметричности в 0,12 мм (T/2) относительно длины корпуса (база «С», рисунок 28).

⁵ Данная величина предельных отклонений ($\pm 0,15$) немного лучше, чем величина отклонений по 10 качеству [44] для максимальной длины $66,5 \times 14 = 931$ js10 ($\pm 0,18$).

Остальные значения допусков формы и расположения поверхностей в ответственных местах так же задаются в пределах 7..8 степеней точности, что является вполне достижимым при растачивании нормальной точности и грубом шлифовании [51].

В целом, разработанная конструкция корпуса соленоида охлаждения позволяет организовать расположение 19 различных (укрупненных) групп конструктивных элементов и сборочных единиц. Данные группы представлены на примере корпуса крайней секции на рисунке 30. Где цифрами обозначены следующие части: (1) Н-образное основание секции с закрепленными на нем П-образными крышками (2) и торцевой крышкой (3), не используемой во внутренних секциях; опоры (4), предназначаются для установки секции на подставку и последующей юстировки секции с контролем по геодезическим меткам (5); окна П-образных крышек (2), предназначенные для прохода выводов обмоток ведущего поля, закрываются небольшими разрезными крышками (6), выполненными из того-же материала что и корпус (Сталь 20); для расстановки обмоток ведущего поля с заданным шагом, к основанию корпуса прикручиваются ключи (шпонки – 7).

Обмотки корректора с вертикальным полем крепятся по группам отверстий (12а, рисунок 30) на основании (1), для организации их коммутации в основании корпуса выполнены пазы под укладку проводников, которые закрываются стальными пластинами (8) таким образом, что коммутирующие проводники не мешают ни закреплению обмоток коррекции ни юстировке обмоток ведущего поля. Другая пара обмоток корректора с вертикальным полем крепится на крышках (2) по группе отверстий (12б) и пазов (12в). Пазы обеспечивают возможность сдвигания обмотки коррекции при установке и снятии крышки (2), освобождая место для свободного прохождения выводов обмоток ведущего поля при проведении данных операций.

Две группы из 6 отверстий (9, рисунок 30) используются для установки монтажных пластин, на которых размещаются колодки силового питания соленоида. Шина от точек заземления (14) выводится на колодку силового питания. Группы отверстий (13а) и (13б), дополненные пазами для прохождения коммутирующих проводников обмоток коррекции, используются для установки монтажных пластин колодок питания корректоров. А обмотки корректора с горизонтальным полем крепятся на внутренней части стенок корпуса по группам отверстий (11а) и (11б).

Коллекторы системы охлаждения крепятся по группам отверстий (10, рисунок 30) к верхней и нижней крышкам корпуса, на которых также находятся отверстия (17) креплений жгута термоклучей и его коммутационных колодок. Группы отверстий (15) применяются для установки защитных кожухов, закрывающих токовые шины и механизмы юстировки обмоток. Группы отверстий (16а) и (16б) используются для установки такелажных точек¹, а группа (19) – для установки идентификационной таблички секции. Между собой секции стягиваются болтами по отверстиям в проушинах (18).

¹ В группе (16а) используется резьба М10, а в группе (16б) Н-образного основания применяется резьба М8.

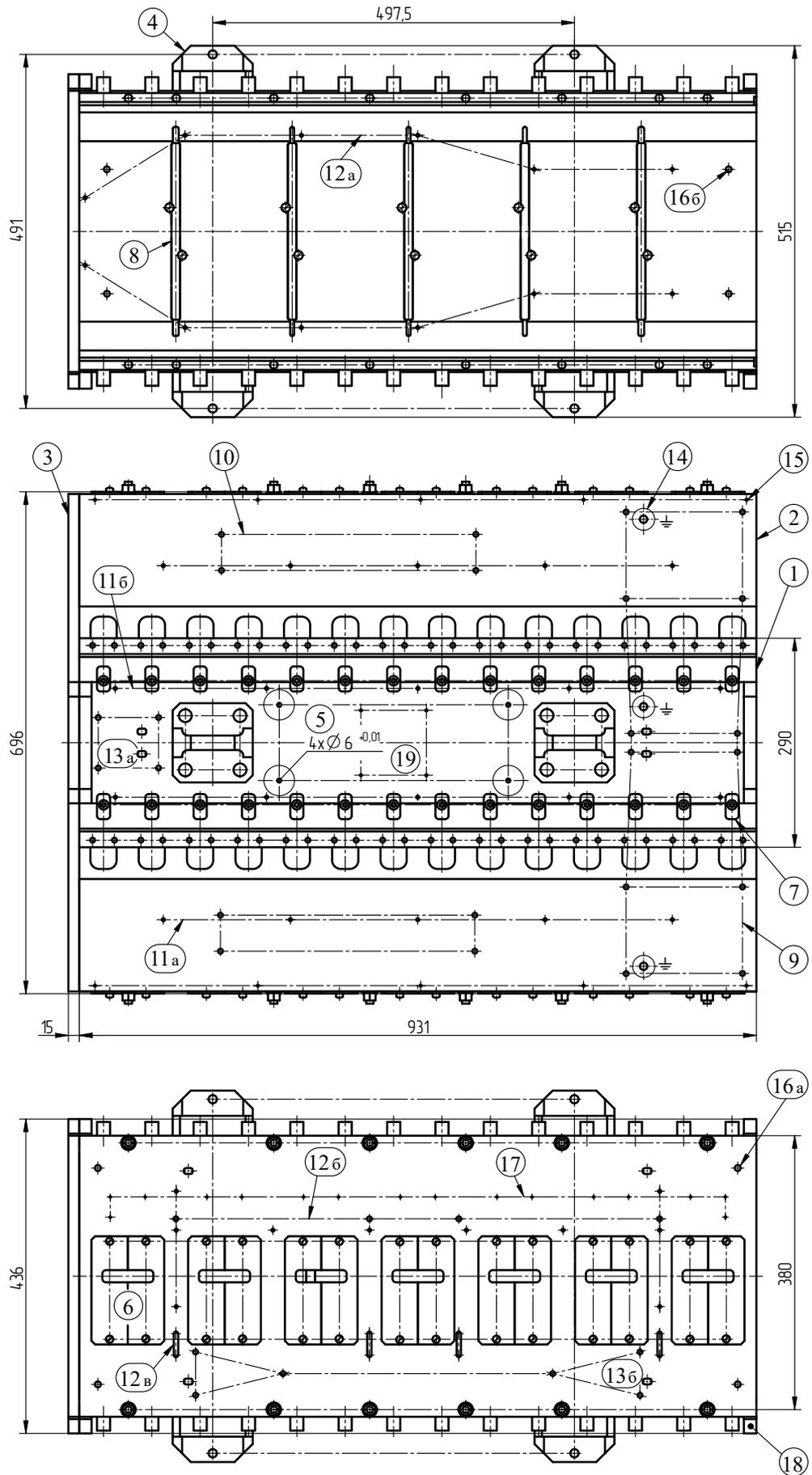


Рисунок 30 – Корпус крайней секции соленоида охлаждения

(На виде снизу – крышка и принадлежности ей крепежные изделия не изображены)

Так же следует отметить то, что на конструкцию секции в определенной мере повлияла необходимость обеспечения чередования пар обмоток (левой и правой намотки), которая пояснялась в разделе 1.1. главы 1 диссертации. При таком чередовании в случае с нечетным числом обмоток (как во внутренних секциях) первая и последняя обмотки в одном канале будут с одним типом намотки («левая-левая» или «правая-правая»), а при четном числе обмоток – с разным (как в крайних секциях – «левая-правая» или «правая-левая»). В качестве решения было предложено каналы секций начинать с обмоток различных по направлению намотки (например, если верхний канал секции начинается с «левой» обмотки, тогда нижний – с «правой»), а следующие друг за другом секции – переворачивать (чередовать нижний и верхний каналы), сохраняя, тем самым, чередование пар обмоток на всей длине соленоида охлаждения.

Это, главным образом, определило конструкцию и место размещения опорного узла на корпусе: так как крышки секций в качестве мест для размещения опор использовать не целесообразно, потому что это не позволит обеспечить одинаковый доступ к внутренним элементам верхнего и нижнего каналов, то для этой цели используется Н-образное основание. Конструктив опоры выполняется в виде формы с осевой симметрией, позволяющей работать как в одном, так и в противоположном направлении. Для размещения опор на основании используются его боковые стенки, к которым по оси симметрии основания прикручиваются опоры, как это показано на рисунке 31. Кольцо $\varnothing 50$ мм, установленное по посадке с гарантированным зазором 0,009 мм (G9/h10) [51], позволяет с хорошей точностью установить опору по оси основания корпуса и принимает на себя поперечные нагрузки от веса секции, исключая тем самым работу винтов на срез. Резьбовое отверстие M12 на опорной площадке служит для размещения установочных винтов и является опорной базой.

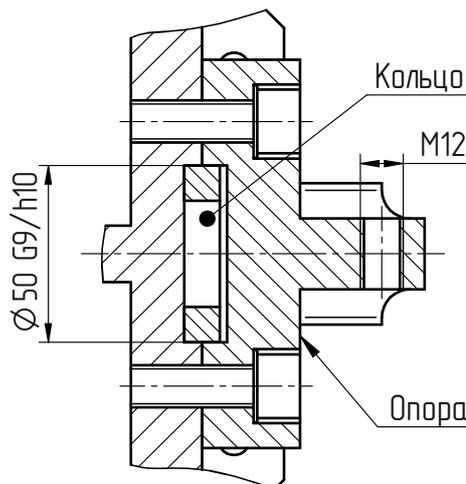


Рисунок 31 – Опора секции (разрез)

Сложность проектирования такой конструкции опоры обусловлена тем, что чем дальше будет расположена база опор (чем больше плечо), тем больший изгибающий момент будет действовать на основание и будет вызывать смещение опорных поверхностей обмоток ведущего

поля соленоида. Разместить опоры «плотно» вдоль стенок основания не позволяют юстировочные и опорные узлы обмоток продольного поля, закрепленные на этих стенках. А возможность продольной задвижки секций на опоры ограничена проушинами (18, рисунок 30). После нескольких итераций расчетов деформаций основания корпуса было определено крайнее положение опорных точек с плечом 245,5 мм (491/2 (мм)) от продольной оси корпуса (рисунок 30), давшее вполне приемлемые результаты смещения опорных поверхностей обмоток – в пределах 0,2 мм (рисунок 32).

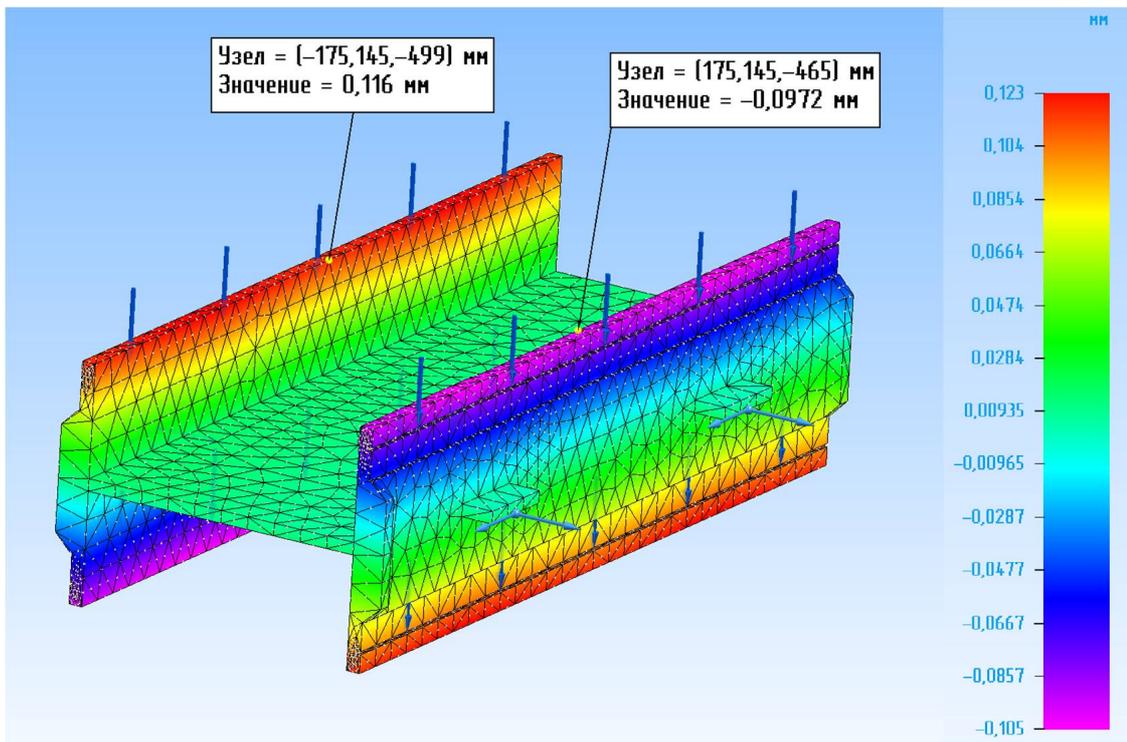


Рисунок 32 – Результаты моделирования деформаций основания корпуса

Для оценки деформаций в качестве расчетной модели была использована схема с шарнирной и шарнирно-подвижной опорами, симуляция методом конечных элементов осуществлялась внутренним расчетным модулем анализа конструкторской системы проектирования. В качестве геометрической модели в анализе использовалась упрощенная твердотельная модель сварной конструкции основания, выполненная в виде одного тела. Деформации рассчитывались от равномерно распределенной нагрузки, создаваемой общим (полным) весом обмоток продольного поля, приложенной на опорных пазах стенок основания.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что возникающие в реальных условиях работы деформации корпуса соленоида не должны вызвать существенного влияния на искажения поля или работоспособность механизма юстировки¹, так

¹ После окончательной слесарной сборки секции опорные и юстировочные узлы обмоток продольного поля проверяются на свободную подвижность обмоток без заклиниваний или люфтов.

как при установке обмоток продольного поля и крышек корпуса жесткость изделия будет возрастать, следовательно, фактические деформации основания должны быть меньше расчетных¹.

1.5 Прототип корпуса секции

Состоятельность принятой концепции создания секционированного, двухканального, соленоида была проверена на начальном этапе работ по проекту электронного охлаждения для коллайдера NICA. Для этой цели было выполнено прототипирование основных узлов секции соленоида охлаждения². Отработка технологии производства была выполнена на прототипе корпуса внутренней секции соленоида охлаждения (рисунок 33). Одна из главных задач прототипирования корпуса заключалась в подтверждении возможности получения действительных размеров базовых поверхностей основания корпуса, определяющих точность расположения обмоток ведущего поля в пределах не ниже 12 квалитета [44].

При оценке приведенных в таблице 9 результатов геометрических измерений основания корпуса следует принимать во внимание то, что основание корпуса прототипа (двутавр) – сварная конструкция, следовательно, в процессе механической обработки и старения сварных швов имеют место различные не прогнозируемые деформации. Измеренные значения размеров прототипа получились, в основном, не грубее предельных отклонений 12 квалитета (js12) [44], что достаточно хорошо для заложенной в основании корпуса сварной конструкции.

По результатам контрольных геометрических измерений корпуса прототипа конструкция была признана удовлетворительной и принята в использование. Заложенные в ней точности базовых поверхностей позволяют достичь высокой однородности магнитного поля, что подтверждается результатами магнитных измерений [24]. По результатам прототипирования в конструкцию корпусов секций соленоида были внесены дополнительные улучшения (например, введена развязка тавровых швов в основании) и такие требования, как обеспечение минимального коробления и деформаций при сварке (в том числе за счет технологических приспособлений), выполнение отжига или, как минимум, виброобработки после сварки. Измеренные действительные значения размеров прототипа принимались во внимание при назначении допусков с симметричными полями для корпусов секций соленоида охлаждения (рисунок 28).

¹ При сборке секций и при работе с механизмом юстировки обмоток, в процессе магнитных измерений обмоток проблем заклинивания обмоток зафиксировано не было.

² Фотография прототипа приведена в приложении Б.

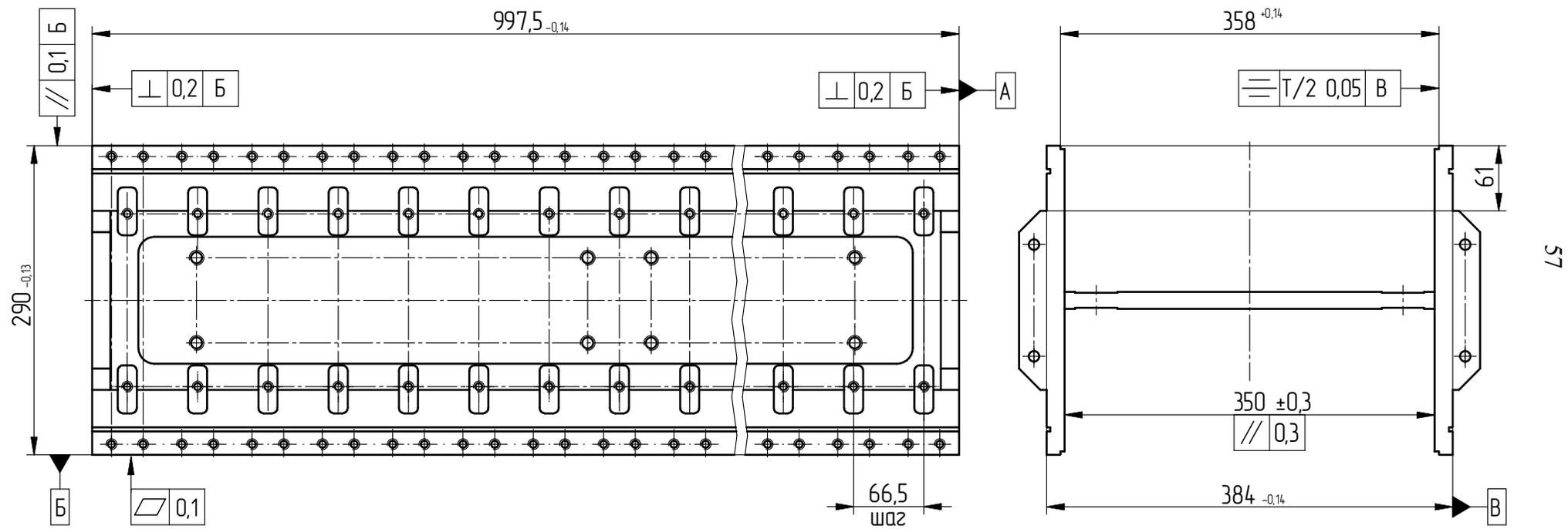


Рисунок 33 – Размеры базовых поверхностей основания секции (прототип)

Таблица 9 – Результаты контрольных измерений основания секции (прототипа)

Описание	Размерное число, мм	Интервал ном. размера (ГОСТ 25346-2013), мм	Ra, мкм	Измеренное значение, мм	Фактическое отклонение, мм	Фактический допуск, мкм	Допуск, мкм (кавалитет), ГОСТ 25346-2013	Фактическое поле допуска
Длина основания	997,5 _{-0,14}	800..1000	1,6	997,4..998,0	+0,5 -0,1	600	560 (11) 900 (12)	k11 (js12)
Ширина основания	384 _{-0,14}	315..400	1,6	383,8..384,02	+0,02 -0,2	220	230 (10)	h10
Уступ	358 ^{+0,14}	315..400	1,6	357,94..358,24	+0,24 -0,06	300	360 (11)	JS11
Ширина проема	350±0,3	315..400	без обработки	349,66..352,1	+2,1 -0,34	2440	2300 (15)	H15
Высота основания	290 _{-0,13}	250..315	1,6	нет данных	–	–	–	–
Шаг базовых отв. (пазов)	66,5±0,28 (66,5±0,15)	50..80	6,3 (3,2)	65,77..67,29	+0,79 -0,73	1520	1200 (15) 1900 (16)	между js 15 и js16

1.6 Секция соленоида охлаждения

Главным образом, конструкция соленоида и его форма обусловлены его физическим назначением и достаточно строго определяются такими обязательными для достижения заданных физических параметров факторами, как: качество и величина ведущего магнитного поля (необходимого для осуществления быстрого электронного охлаждения); место расположения изделия и способы его сопряжения с коллайдером NICA; техническая возможность изготовления обмоток с требуемыми параметрами (которые, в свою очередь, определяются компоновкой сечения соленоида (рисунок 5)). И хотя внешний вид изделия в большей степени определяется его конструкцией [52], это не исключает применения базовых принципов художественного конструирования при оценке расположения функциональных частей установки, в том числе, с позиции эргономики. Компоновочные решения не должны вызывать сомнений в устойчивости, должны быть уравновешены и сбалансированы.

Следует уточнить, что описанная ранее конструкция корпусов секций соленоида обусловлена, в том числе, расположением внешних функциональных частей соленоида, которое определяется принятым компоновочным решением (рисунок 34).

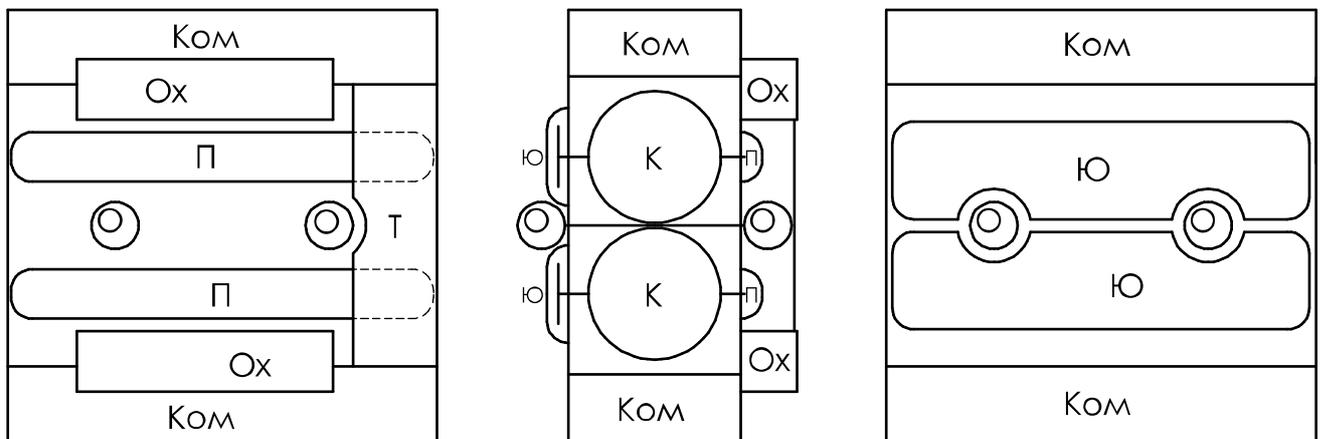


Рисунок 34. Общая компоновка секции соленоида охлаждения

Согласно принятому компоновочному решению функциональные части секций располагаются симметрично относительно медианной плоскости, в которой расположены опоры (О, рисунок 34). Основные обмотки соленоида (К) размещаются таким образом, чтобы юстировочные узлы (Ю) оказались с внутренней стороны соленоида, в месте, которое наименее доступно для случайных воздействий при эксплуатации (что уменьшает вероятность внешнего воздействия на юстировку). Следовательно, с противоположной стороны располагается группа

опор обмотки (П). На верхней и нижней сторонах секции находятся места коммутации основных и корректирующих обмоток (Ком), рядом с которыми удобно расположить водяные коллекторы (Ох) и места подвода силового питания (Т), причем данная функциональная группа целенаправленно увеличена, для того чтобы иметь возможность внутри нее организовать места для вывода цепей коррекции, защиты, питания прогрева и др.

При рассмотрении одной секции такая компоновка может создавать некоторое ощущение неуравновешенности за счет не симметрично расположенной терминальной группы и смещенных коллекторов водяного охлаждения, но при рассмотрении всего соленоида охлаждения (рисунок 35) она позволяет создать определенный (укрупненный) ритм расположения составных частей соленоида, и весь участок охлаждения уравнивается за счет чередования и разворота секций. Чередование секций также позволяет выполнить их последовательную коммутацию, задействовав терминальные группы, что дополнительно позволяет выбрать удобное место для ввода силового питания обмоток (И).

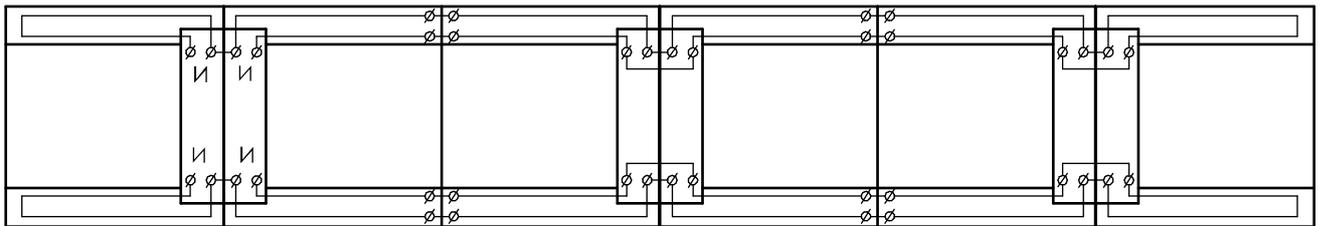


Рисунок 35 – Компоновка соленоида охлаждения

Помимо организации основных функциональных групп, обозначенных на рисунке 34, в конструкции также предусмотрены: дополнительные площадки (под установку клеммных колодок коммутации цепей коррекции (позиции 21, 22 рисунок 36)); пути прокладки проводников, коммутирующих цепи коррекции (с крепежными скобами, позиция 79, рисунок 36 (лист 1) и местами для вывода цепей наружу корпуса (пазы 12x8 мм)); защитные кожухи, закрывающие электрические цепи (позиции 24-30, рисунок 36); стойки для крепления клеммных площадок и кожухов (позиции 15-18, рисунок 36); пластина, поддерживающая вакуумную камеру (позиции 23, рисунок 36 (лист 1)); транспортные фиксаторы¹ (позиции 32, 33, рисунок 36 (лист 2)). Отдельно выполнялась разработка жгута, соединяющего термокючи² (позиция 13, рисунок 36 (лист 2)); для фиксации жгута используются монтажные скобы, расположенные вдоль по его трассе (позиция 79*, рисунок 36 (лист 2)).

¹ Устанавливаются для предотвращения повреждений юстировочных узлов обмоток при перевозке секций.

² Проведено трассирование проводников, соединяющих термокючи, и разбивка цепи термокючей на две линии (создание двух линий в цепи - облегчает поиск неисправностей за счет уменьшения числа элементов в одной цепи).

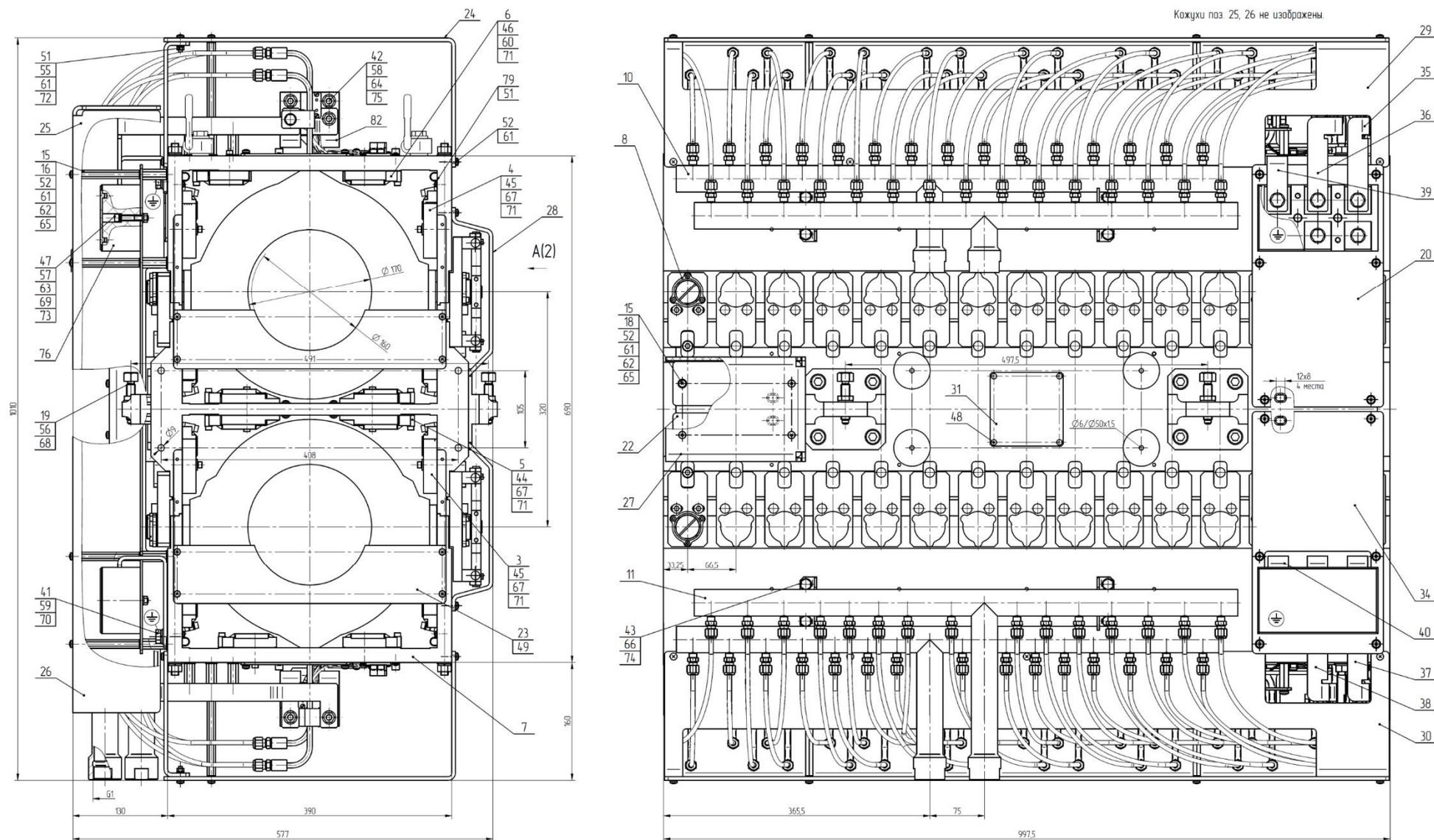


Рисунок 36 – Фрагмент сборочного чертежа внутренней секции соленоида (лист 1 из 2)

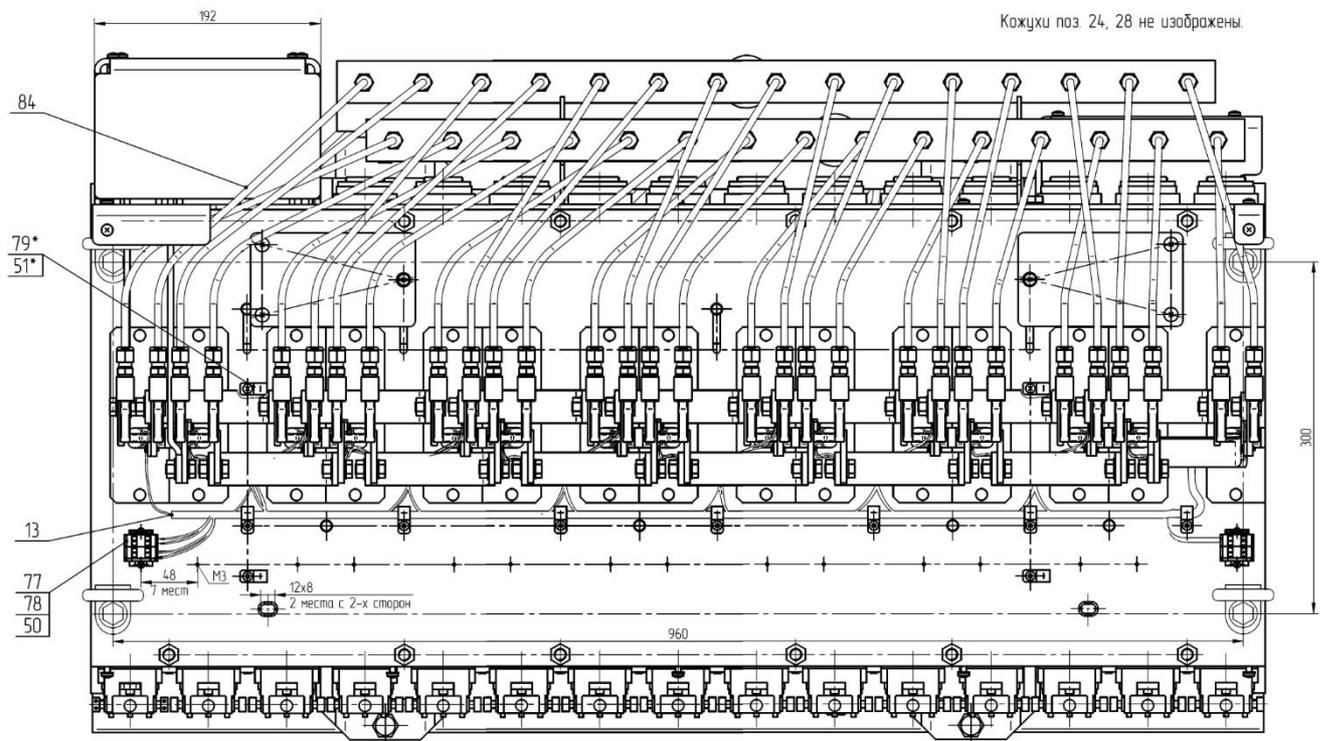
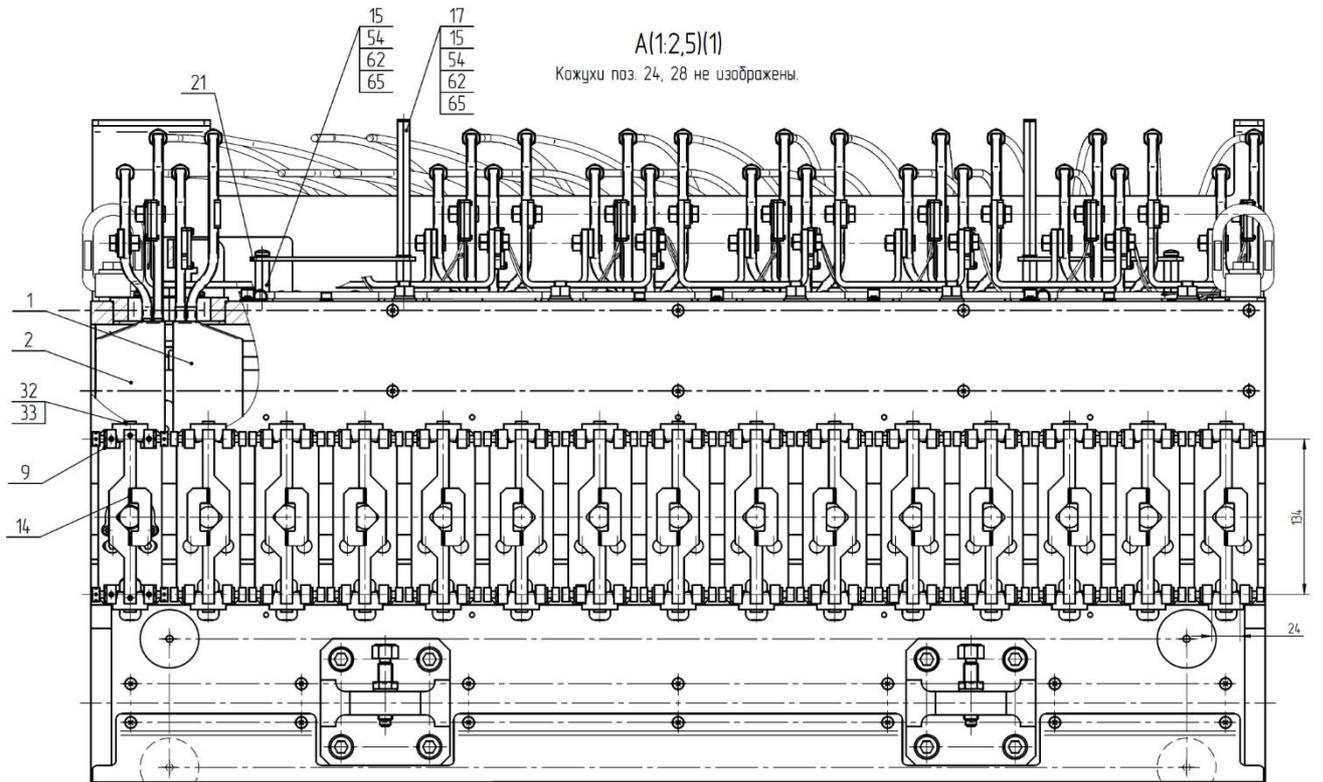


Рисунок 36 (лист 2 из 2)

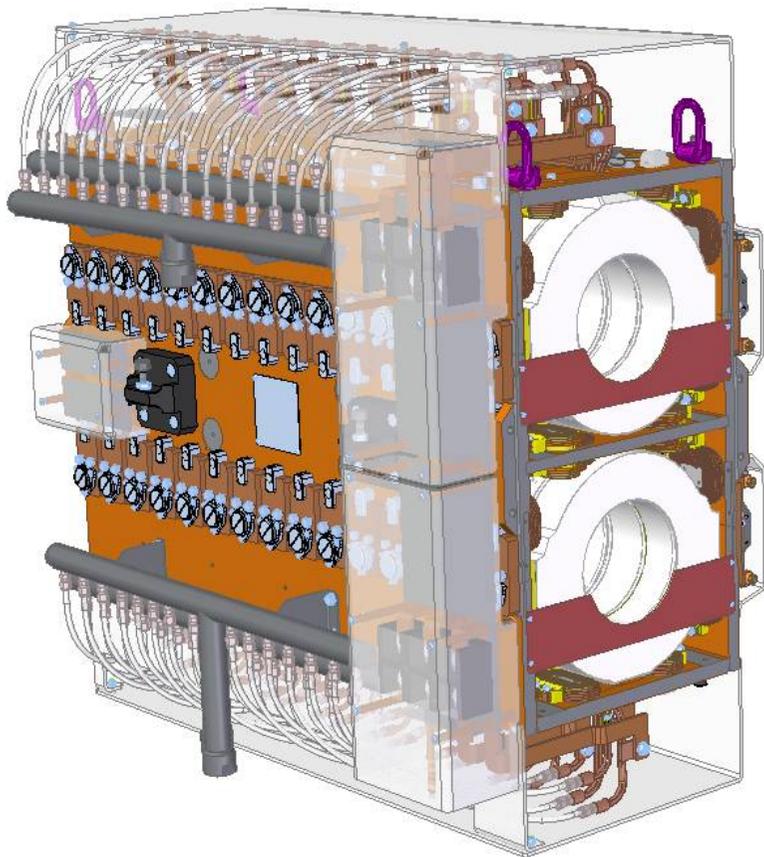
Идентификационная табличка (позиция 31, рисунок 36 (лист 1)) с указанным весом изделия и данными о расходе охладителя располагается на секции со стороны терминальной группы. Для установки секций в проектное положение с двух сторон корпуса предусмотрены места для установки геодезических меток, выставка секций в проектное положение осуществляется при сопутствующем контроле методом лазерного трекинга.

Функциональные группы компоновки, выделенные на рисунке 34, в конструкции изделия представлены следующими элементами: опора (О) – регулировочным винтом (позиция 19, рисунок 36 (лист 1)); основные обмотки (К) расположены в позициях 1, 2 (рисунок 36 (лист 2)); юстировочные узлы – опорой и водилом (позиции 9, 14, рисунок 36 (лист 2)); подшипниковые опоры (П) – позицией 8 (рисунок 36 (лист 1)); группа коммутации (Ком) – жгутом термоклучей (позиции 13), монтажной пластиной (позиции 21), клеммными колодками “WAGO” [53] (позиции 77, 78, изображенными на рисунке 36 (лист 2)) и шинами (позиции 35-40, 82 рисунок 36 (лист 1)); охлаждение (Охл) – коллекторами (позиции 10, 11, рисунок 36 (лист 1)) и трубками (позиции 84, рисунок 36 (лист 2)); подвод силового питания (Т) – монтажными пластинами (позиции 20, 34) и клеммной колодкой (позиция 76), изображенными на рисунке 36 (лист 1).

Крайние секции соленоида охлаждения выполнены в такой же компоновочной схеме и отличаются только меньшим числом основных обмоток (14 против 15) в канале охлаждения и наличием фланца на корпусе секции (3, рисунок 29). Технические характеристики секций двух типов представлены в таблице 10.

Также на рисунке 36 (лист 1) обозначены корректирующие обмотки (позиции 3-6) и корпус секции соленоида (позиция 7). Позициями 41-75 (рисунок 36) обозначены стандартные крепежные изделия. Спецификация секции пронумерована на 84 позиции. Фрагменты чертежа (рисунок 36) приведены специально для подчеркивания глубины проработки изделия, большая часть слесарных работ по которому, отводится на выполнение экспериментального производства ИЯФ СО РАН, за исключением выполнения коммутации корректирующих обмоток и проведения измерений полей соленоида (проводимых в лаборатории 5-2 института).

Все конструкторские работы, включая расчеты методом конечных элементов, выполнены в одном комплексе программ автоматизированного проектирования используемом в НКО ИЯФ СО РАН. Всего электронная модель сборочной единицы секции охлаждения, представленная на рисунке 37 а, содержит: 566 подборок, из которых 41 – уникальные и 6 889 деталей, из которых 356 – уникальны, при общем объеме документа 656 Мб (рисунок 37 б). Для сравнения, автомобиль ВАЗ 2101 состоял примерно из 10 000 деталей [16].



а

Статистика по сборке

Имя документа сборки: [REDACTED]
 Имя файла: [REDACTED]
 Адрес: [REDACTED]

Всего деталей:	6889	Всего подборок:	566
Уникальных деталей:	356	Уникальных подборок:	41
Упрощенных деталей:	83	Упрощенных подборок:	2
Всего уровней:	4	Внешних документов:	0
		Общий размер документа:	656,01Мб

Имя документа	Имя файла	Тип	Состоян...	Размер ...	Число
001-M34894-P-1.par	001-M34894-P-1.par	Деталь	Неактив...	1,40Мб	4
001-M35328-P-3.par	001-M35328-P-3.par	Деталь	Неактив...	1,11Мб	4
001-M35329-P-2.par	001-M35329-P-2.par	Деталь	Неактив...	7,18Мб	4
Adj_Cover_v1.psm	Adj_Cover_v1.psm	Деталь	Неактив...	975,50Кб	2
Adjustment_Fix_cover_new_...	Adjustment_Fix_cover_ne...	Сборка	Активный	196,00Кб	30
CC_TB_WAGO_Plate.psm	CC_TB_WAGO_Plate.psm	Деталь	Неактив...	318,50Кб	4
CC_Wago_Cover.psm	CC_Wago_Cover.psm	Деталь	Неактив...	790,00Кб	1
CC_WAGO_Plate_2.psm	CC_WAGO_Plate_2.psm	Деталь	Неактив...	296,00Кб	2

OK Справка

б

Рисунок 37 – Секция соленоида охлаждения: а) изображение ЭМСЕ; б) статистические сведения ЭМСЕ

Таблица 10 – Техническая характеристика секций соленоида охлаждения

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	внутренняя	крайняя
Тип секции	внутренняя	крайняя
Индекс обозначения COOL (рисунок 6)	2, 3, 4, 5	1, 6
Число основных обмоток на канал (общее), шт	15 (30)	14 (28)
Сопротивление основных обмоток на канал, (20°C) мОм	191	178
Рассеиваемая мощность канала (общая), кВт	9,7 (19,4)	9,0 (18,1)
Расход охладителя ¹ на канал (общий), л/мин	11,2 (22,4)	10,4 (20,8)
Падение давления охладителя, бар	7,3	
Ток основных обмоток, А	220	
Вес ² , кг	1 150	1 110
Габаритные размеры В x L x Н, мм	577x997,5x1010	577x946x1010

1.7 Подставки и гирдер

Для установки соленоида охлаждения в тоннеле коллайдера NICA реализовано решение характерное, скорее, для ускорителей элементарных частиц, магнитные системы которых состоят из дискретных элементов, формирующих магнитную оптическую систему с сильной фокусировкой, чем для СЭО. Потому что элементы магнитной части установок электронного охлаждения, главным образом, непосредственно сопряжены с соленоидом охлаждения (в том числе механически: они базируются и могут быть закреплены на нем или общей раме установки, позволяющей выполнить необходимую механическую юстировку).

При значительных увеличениях размеров участка охлаждения приходят к секционированным установкам с индивидуальным креплением элементов магнитной системы, как например это сделано на электронном охладителе Recycler ring (Fermilab, США), где при длине участка охлаждения в 20 м [54] для установки секций соленоида имеющих длину 188 см

¹ Вода, $\Delta T=12,5K$.

² Общий вес соленоида охлаждения без вакуумной камеры, подставок и гирдера 6 820 кг. Подставки и гирдер добавляют 3 760 кг. Общий вес участка составляет около 11 т (10 800 кг).

(при весе 255 кг) применяются индивидуальные крепления (потолочные подвесы) с юстировочным механизмом используемым для выставки секций с точностью в 0,2 мм (при помощи лазерного трекинга по геодезическим меткам, расположение которых соотнесено с магнитным центром секций с точностью в 0,1 мм) [55]. Так же, подразумевается возможность юстировки секций, по результатам магнитных измерений поля установленного на месте соленоида [56].

Идея нашего решения заключается в том, что отдельные элементы (секции соленоида охлаждения (1, рисунок 6)) устанавливаются на индивидуальные подставки (2), закрепленные и продольно перемещающиеся на гирдере (3), состоящем из двух половинок по 3 м. Длина которых определена, главным образом, технологическими возможностями экспериментального производства ИЯФ СО РАН и возможностью их перемещения внутри помещений ускорительного комплекса NICA. Гирдер крепится к полу здания в тоннеле коллайдера. В опорах гирдера размещаются винты для его выставки в проектное положение, сами опоры монтируются в проектных положениях (рисунок 38) до установки гирдера.

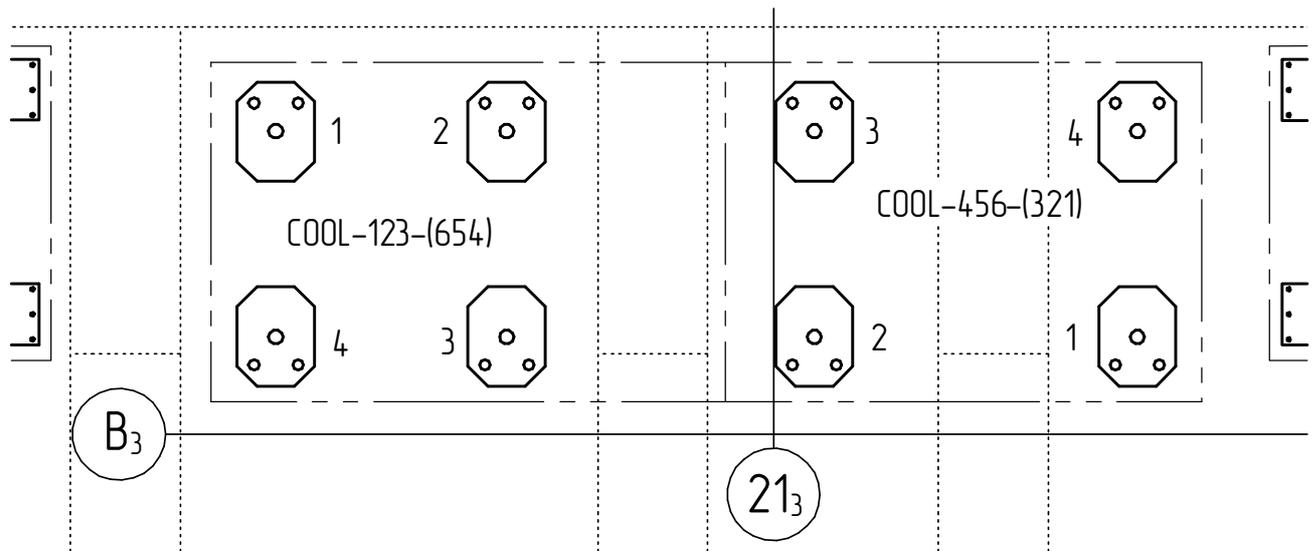


Рисунок 38 – Расположение опор гирдера в проектных осях здания:
пунктиром показаны каналы в полу здания

При правильном монтаже половинок гирдера поверхности рельса выставятся в рабочее положение. Для обеспечения однозначного сопряжения половинок при последующих монтажах устанавливаются штифты. После этого на гирдер возможно устанавливать подвижные подставки (механика перемещения которых подробно описана в начале главы 1) и секции соленоида охлаждения. Подставки секций соленоида (рисунок 39) выполнены в виде перевернутой П-образной рамы с четырьмя вертикальными стойками (1), которые в нижней

части связаны перемычками (2). Стойки и перемычки изготавливаются из труб прямоугольного сечения (из конструкционной стали обыкновенного качества). В верхней части стоек (1) размещаются опорные площадки секций соленоида с юстировочными винтами (3) и штанги (4, $\text{Ø}36$ мм), предназначенные для возможного крепления измерительных устройств при регулировке положения обмоток ведущего поля. Снизу на стойках (1) устанавливаются каретки линейного перемещения. Вес одной подставки приблизительно равен 110 кг.

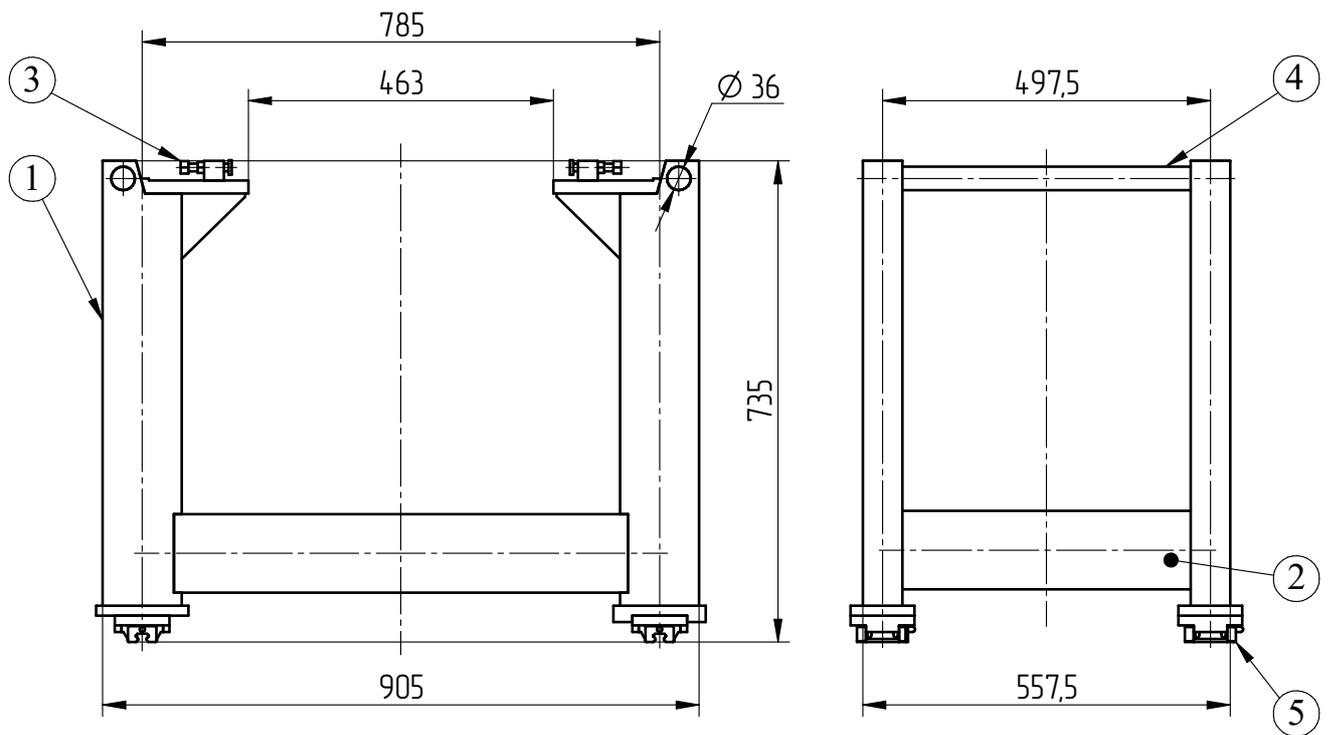


Рисунок 39 – Подставка секции соленоида

Для обеспечения желаемых точностей перемещения и повторяемости применены линейные рельсовые направляющие HIWIN (Тайвань) серии HG [21], рекомендуемые для применения в токарных и обрабатывающих центрах. Техническая характеристика применяемых в конструкции кареток с широким присоединительным фланцем (HGW 20CC) приведена в таблице 11.

Рельсовые направляющие с шариковыми каретками выбраны в качестве механизма линейного перемещения по таким критериям, как: легкость перемещения (низкий коэффициент трения), высокая точность позиционирования, длительный срок службы (малый износ контактов качения), взаимозаменяемость и легкость установки. Последние, в частности, обусловлены особенностями конструкции кареток серии HG, способствующей их самоустановке и снижению ошибок установки, вызванных неровностями установочной поверхности. Важно отметить, что в нашем случае больше важна не столько точность позиционирования (перемещения), сколько повторяемость – когда после откатки, с целью

доступа к элементам, размещенным внутри соленоида, секция возвращается в исходное положение.

Таблица 11 – Техническая характеристика каретки HGW 20CC (HIWIN)

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Базовая динамическая нагрузка, кН	27,1
Базовая статическая нагрузка, кН	36,68
Масса каретки, кг	0,52
Удельная масса рельса, кг/м	2,21
Класс точности	C (нормальный)
Допустимые отклонения кареток по высоте, мм	±0,1
Допустимые отклонения кареток по ширине, мм	
Средние отклонения кареток по высоте, мм	0,02
Средние отклонения кареток по ширине, мм	

Схема установки – типовая: два рельса закреплены на гирдере (рисунок 40), а четыре подвижные каретки – на подставках. Для обеспечения нормальной работы механизма перемещения при легком натяге, рекомендуемом для транспортных систем, производителем HIWIN предъявляются менее высокие требования к выставке рельсовых опор (таблица 12), по сравнению с требованиями к аналогичным направляющим других производителей, например, SRG 20 от THK (Япония) [57], где требуется параллельность 8 мкм, при взаимном отклонении рельсов по высоте 150 мкм (на базе $a = 500$ мм, рисунок 40).

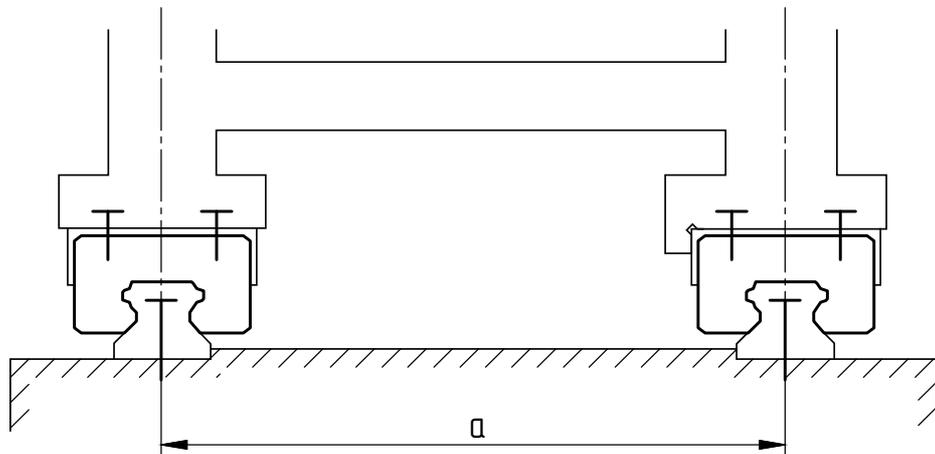


Рисунок 40 – Схема установки линейных рельсовых направляющих

Таблица 12 – Рекомендуемые требования к выставке рельсовых опор (HIWIN)

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Класс натяга	Z0 (легкий)
Величина натяга	0...0,02С ¹
Параллельность рельсов, мкм	25
Взаимное отклонение рельсов по высоте (базе а=500 мм), мкм	130
Момент затяжки установочных винтов (M5x0.8-16L), Н/см	883 ²

Можно отметить, что по рекомендациям ТНК отклонение по высоте рассчитывается по формуле:

$$X = 0,00030 \cdot a, \quad (26)$$

где а – расстояние между осями рельсов (рисунок 40), таким образом, для нашей конструкции, при а = 785 мм данное требование может быть определено как:

$$X = 0,00030 \cdot 785 = 236 \text{ (мкм)}. \quad (27)$$

Опираясь на результаты выражения (27) взаимное отклонение рельсов по высоте вполне может быть увеличено со 130 мкм до 240 мкм, что позволяет использовать более грубые методы обработки. Так, для данного интервала размеров значения допусков сдвигаются с 8 до середины между 9..10 квалитетами [44].

Данное отношение выглядит очень логичным, и с учетом того, что при увеличении расстояния между опорами взаимные отклонения от общей плоскости опорных площадок будут вызывать меньшие величины относительных перекосов кареток и рельса, следовательно, и меньшие моменты сил, влияющие на условия работы пар качения.

Другие характеристики пар ТНК, выглядят избыточными³. Например, допуски по высоте -0,03 мм (минус), ширине -0,02 мм (минус), параллелизм хода в 11 мкм на перемещениях до 3150 мм, при учете уже достаточных точностей позиционирования секций в 0,2 мм [55].

Реализация схемы установки механизма линейного перемещения, изображенная на рисунке 40, для достижения требований параллельности и взаимного отклонения рельсов по высоте требует соблюдения определенных правил выставки рельса на гирдере. Так, при

¹ С-динамическая грузоподъемность.

² 90 кгс/см.

³ Для применения в разработанной конструкции механизма перемещения подставок.

обработке буртика, сопрягаемого с торцевой поверхностью рельса, допустимые отклонения можно оценить, как половину от предъявляемых производителем требований к параллельности в 13 мкм ($0,5 \cdot 25$ мкм). Что соответствует 4..5 степени точности [44]. А общая плоскостность опорных площадок (по отношению к прилегающей плоскости проходящей через них) будет находится в пределах 9..10 степеней точности [44]. Она должна быть не хуже 0,11 мм ($0,5 \cdot 220$ мкм). Таких значений можно достичь при точном шлифовании и, соответственно, при фрезеровании [51].

Конечно, шлифование с высокими степенями точности изделий с такими габаритными размерами (3000 x 865 x 650 h (мм)) очень сложная операция, требующая специального оборудования, которым наш институт не располагает (габаритная высота шлифовки в экспериментальном производстве ограничена в 600 мм). Но косвенно возможна такая обработка с различными технологическими приемами (например, проточкой шлифовального круга до меньшего диаметра). Преимуществом использования шлифования для обеспечения параллельности рельсов является последующая легкость выставки рельсов на половинке гирдера и их стыковки на всей длине гирдера. Однако при невозможности выполнения шлифования, обеспечивающего прямолинейность и параллельность упорных площадок под рельс (буртиков), в данной конструкции остается возможность перейти к установке без базовой кромки (буртика). В таком случае основная опора (один рельс) устанавливается в рабочее положение при использовании микрометрической индикаторной головки (и (или) поверочной линейки), а вторая опора устанавливается по основной так же при помощи индикаторной головки (поверочной линейки), либо такая же последовательность установки осуществляется при геометрическом нивелировании. И в том и другом вариантах установки важно соблюдать правильное усилие затяжки винтов крепления рельса 883 Н·см (для винта М5 x 0.8 - 16L).

Сказанное выше приводит к следующей постановке задачи проектирования: конструкция гирдера должна обеспечивать жесткость, достаточную для того, чтобы требования на размещение направляющих были не только соблюдены, но и действующие нагрузки (создаваемые размещаемыми на нем элементами) не приводили к нарушению этих требований, вызывая тем самым отказы перемещений. Другая задача проектирования была определена идеей максимальной развязки сетей электрического питания установки от каналов, предлагаемых в проекте помещений размещения СЭО на ускорительном комплексе NICA для организации инженерных сетей. Решение этой задачи заключалось в комплексном проектировании элементов установки совместно со специалистами проектного отдела ИЯФ СО РАН, так как это требовало не только определения мест и возможности крепления лотков кабельных трасс, но и расчетов их количества, вместимости и возможности доступа к кабельным линиям.

Результатом решения данных задач стала конструкция, представленная на рисунке 41, где гирдер (1а), с закрепленными на нем рельсовыми направляющими (3), устанавливается на опорах (2), план расположения которых изображен на рисунках 38 и 55. Швеллер, образующий боковые стенки каркаса гирдера, усиливается вертикальными ребрами (16). Бобышки со штифтами (4), привариваемые на верхней и боковой поверхностях гирдера (по линии разъема половинок) после окончательной выставки стыка рельсовых опор, необходимы для обеспечения повторных разборки и сборки гирдера. Внутри каркаса на поперечных рейках (5а) в три уровня устанавливаются металлические кабельные лотки системы «S5 Combitech» ДКС (Россия) [58], предназначенные для размещения кабелей силовых цепей, цепей коррекции, сигнальных цепей датчиков положения пучка и цепей прогрева вакуумной камеры. Доступ к кабельным линиям возможен через окна, располагающиеся на верхней и боковых поверхностях, перегородке и в доньях половинок гирдера. Гирдер изготовлен из конструкционных сталей обыкновенного качества, его вес приблизительно равен 3 100 кг.

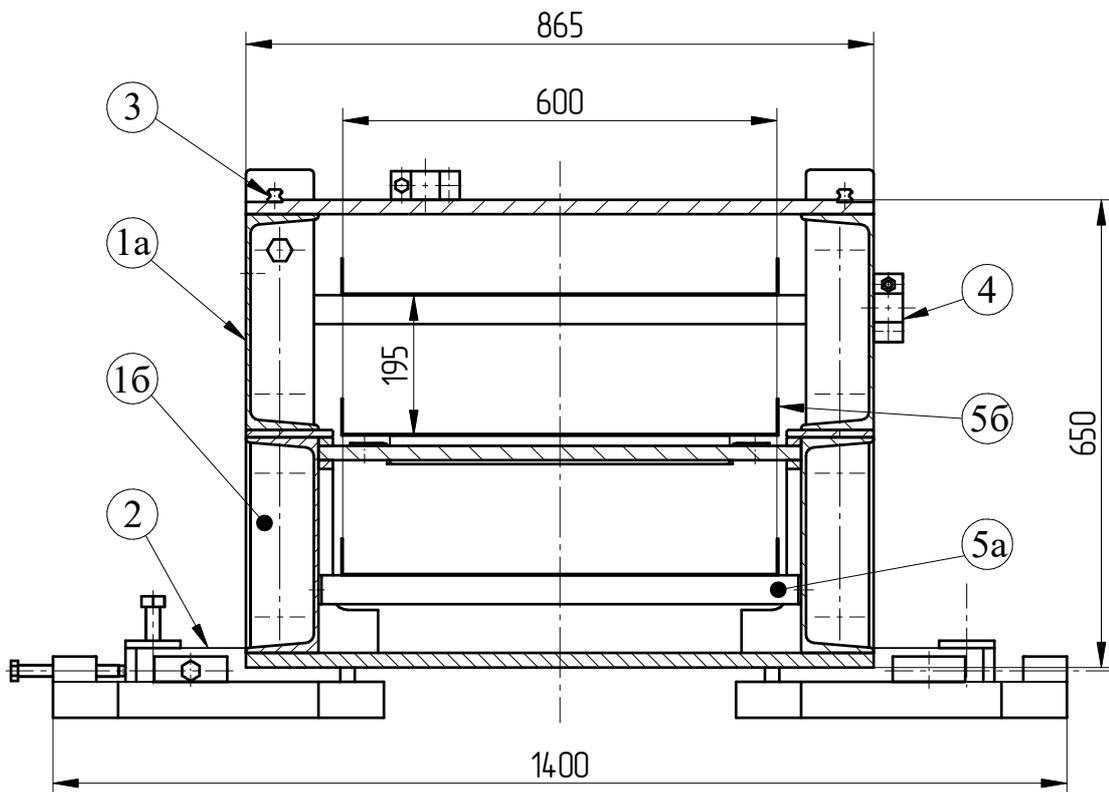


Рисунок 41 – Поперечный разрез гирдера

Нижние швеллеры, лежащие в основании гирдера, развернуты относительно верхних (рисунке 41) не случайно. Целью такого разворота было визуальное уменьшение основания гирдера, что зрительно делает конструкцию более легкой [52] и так же (зрительно) увеличивает верхнюю поверхность гирдера, создавая ощущение его основательности.

Для оценки жесткости конструкции было проведено моделирование напряженного состояния для одной половинки гирдера (рисунке 42) при нагрузке 60 кН. Такая нагрузка определяется общим весом секций соленоида, размещаемых на половинке гирдера, их подставок и вакуумной камеры (1,2-1,3 т вес одной «метровой» секции с подставкой), взятых с запасом в 1,5 раза. В качестве расчетной модели была использована схема с неподвижными опорами, вычисления осуществлялись внутренним модулем конечно-элементного анализа конструкторской системы проектирования. В качестве геометрической модели использовалась упрощенная эскизная сборочная модель гирдера. Деформации рассчитывались от равномерно распределенной нагрузки, приложенной к опорным плоскостям рельса.

Результаты численного моделирования, представленные на рисунке 42, показали следующие значения деформации базовых поверхностей: менее 75 мкм в вертикальной плоскости и в пределах ± 3 мкм в горизонтальной плоскости (относительно оси симметрии гирдера, суммарно – 6 мкм). Такие величины, в соотношении с предъявляемыми требованиями к установке линейных направляющих, являются заметными, но с учетом ранее описанных допусков обработки базовых поверхностей в 13 мкм (параллельность) и 0,11 мм (плоскостность) не выходят за требуемые производителем 25 мкм и 0,22 мм, соответственно.

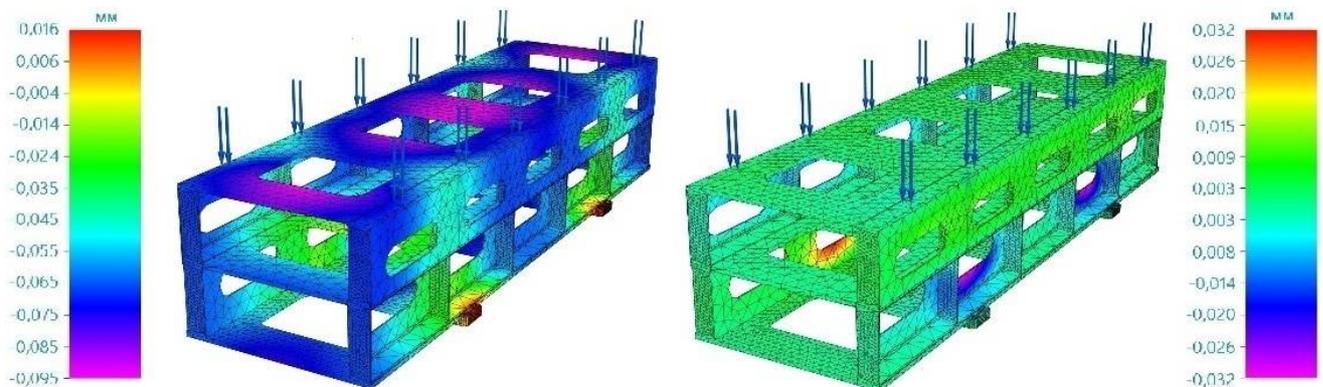


Рисунок 42 – Деформации гирдера под нагрузкой: в вертикальной плоскости – слева, в горизонтальной плоскости – справа

Полученные результаты моделирования позволяют судить о том, что возникающие в реальных условиях работы деформации гирдера не должны нарушать работоспособность механизма линейного перемещения секций. Конструкция показывает хорошую жесткость и с достаточным запасом соответствует требованиям производителя [21] к установке рельсовых направляющих.

Глава 2 Ввод-вывод ионного пучка

В установках электронного охлаждения помимо центрального соленоида, обеспечивающего правильное протекание процесса охлаждения, не малое внимание уделяется месту сведения (и разведения) ионного и электронного пучков (рисунок 43). В таких установках ставится задача не просто проведения двух пучков в одном канале вакуумной камеры, а именно корректного сведения двух пучков разных частиц и 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, необходимого для ввода ионного пучка; 2) согласующей секции 1-2 кГс, обеспечивающей плавное изменение магнитного поля, не приводящее к нагреву электронов; 3) дипольного корректора положения ионного пучка. Внутри каналов тороида размещаются вакуумные камеры сложной пространственной конфигурации.

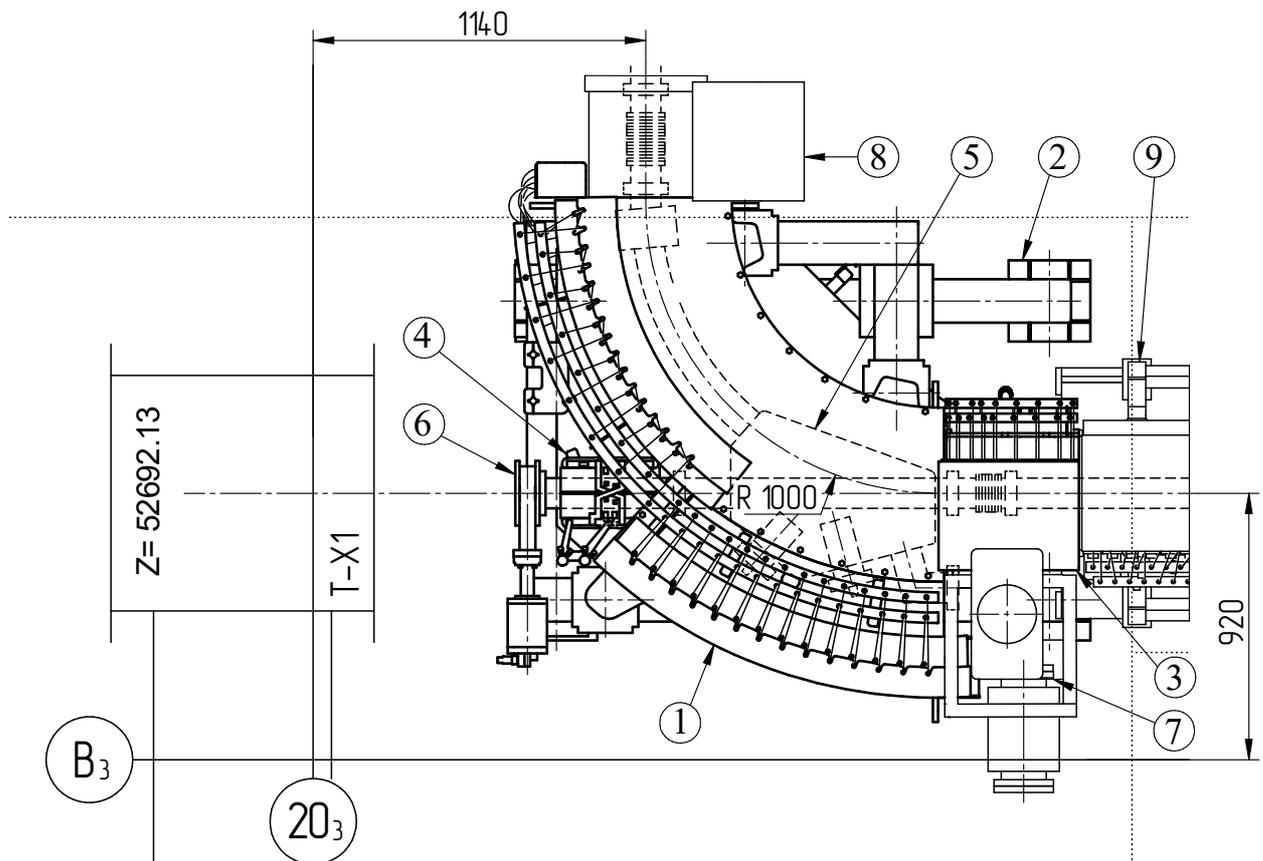


Рисунок 43 – Место ввода-вывода ионного пучка в зоне перехода «тепло-холод» (Т-Х1)

На рисунке 43 показан общий вид места ввода-вывода ионного пучка находящегося в зоне перехода Т-Х1 (обозначения ОИЯИ). Участок ввода-вывода ионного пучка, находящийся с противоположной стороны в зоне перехода Т-Х2, представляет собой зеркальный вариант первого. Компоновку и конструкцию в большей степени определяет тороид (1, рисунок 43),

размещенный на подставке (2). Тороиды являются последними элементами транспортной системы холодного электронного пучка (от пушки к участку охлаждения) и начальными элементами транспортировки нагретого в процессе охлаждения электронного пучка в рекуператор. Вакуумные камеры (5) верхнего и нижнего каналов тороида, рассчитанные на проведение электронного пучка с орбитой в 1м, соединяются с вакуумной системой коллайдера через шиберы (6), после которых на корпусе тороида устанавливаются дипольные корректоры ионного пучка (4). В каждой вакуумной камере тороида (5), помимо раздваивающихся вакуумных камер пучков, размещены: очищающие электроды ¹; два геттерных насоса; сделан порт (отвод) для соединения с откачным оборудованием (7).

В виду того, что энергопотребление установки электронного охлаждения было ограничено величиной в 700 кВт [59], и соленоиды, входящие в состав транспортной системы, работают на меньших полях ², то для согласования магнитных полей между тороидом (1, рисунок 43) и соленоидом охлаждения (9) устанавливаются дополнительные согласующие секции (3) длиной 460 мм. Согласующие секции обеспечивают изменение поля по заданной функции (рисунок 44), не вызывая нагрева электронного пучка [41]. Согласующие секции (3) являются местом финальной сборки участка охлаждения СЭО. Соленоид охлаждения (9) и соединительные вставки (8), установленные со стороны транспортной системы на рисунке 43, изображены для задания обстановки. Положение элементов (рисунок 43) дано относительно проектных осей здания (В₃ и 20₃).

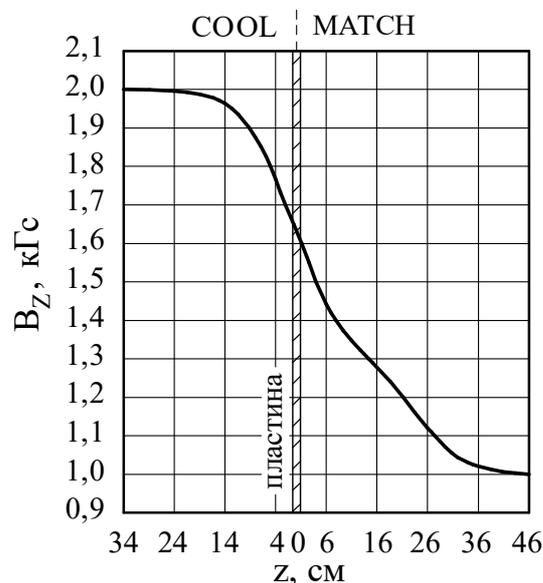


Рисунок 44 – Продольное поле согласующей секции

¹ Захватывающие свободно дрейфующие электроны. Расположены со стороны вставок транспортного канала.

² После выхода соленоида, транспортирующего электронный пучок, из высоковольтного объема, продольное магнитное поле увеличивается с 0,5 кГс до величины в 1 кГс, а на участке охлаждения поле поднимается до необходимого значения в 2 кГс.

2.1 Дипольный корректор ионного пучка

По ходу движения пучка ионов в коллайдере, первым пройденным элементом магнитной системы установки электронного охлаждения будет дипольный корректор ионного пучка, позволяющий корректировать положение ионного пучка в горизонтальной и вертикальной плоскости (X-Y корректор). Он изображен на рисунке 45, где на сплошном (не шихтованном) O-образном стальном сердечнике (1), изготовленном из качественной конструкционной стали (сталь 10), размещаются водоохлаждаемые обмотки вертикальной коррекции (2, рисунок 45, с характеристикой по таблице 13) и обмотки горизонтальной коррекции (3, рисунок 45, с характеристикой по таблице 14). Водяное охлаждение обмотки горизонтального поля обусловлено необходимостью обеспечения большей величины поля (большого диапазона корректировки ионного пучка) в плоскости поворота электронного пучка. Такие же дипольные корректоры устанавливаются на выводе ионного пучка (верхний и нижний каналы коллайдера являются встречными направлениями) и крепятся к средней стенке (4), разделяющей верхний и нижний каналы тороида.

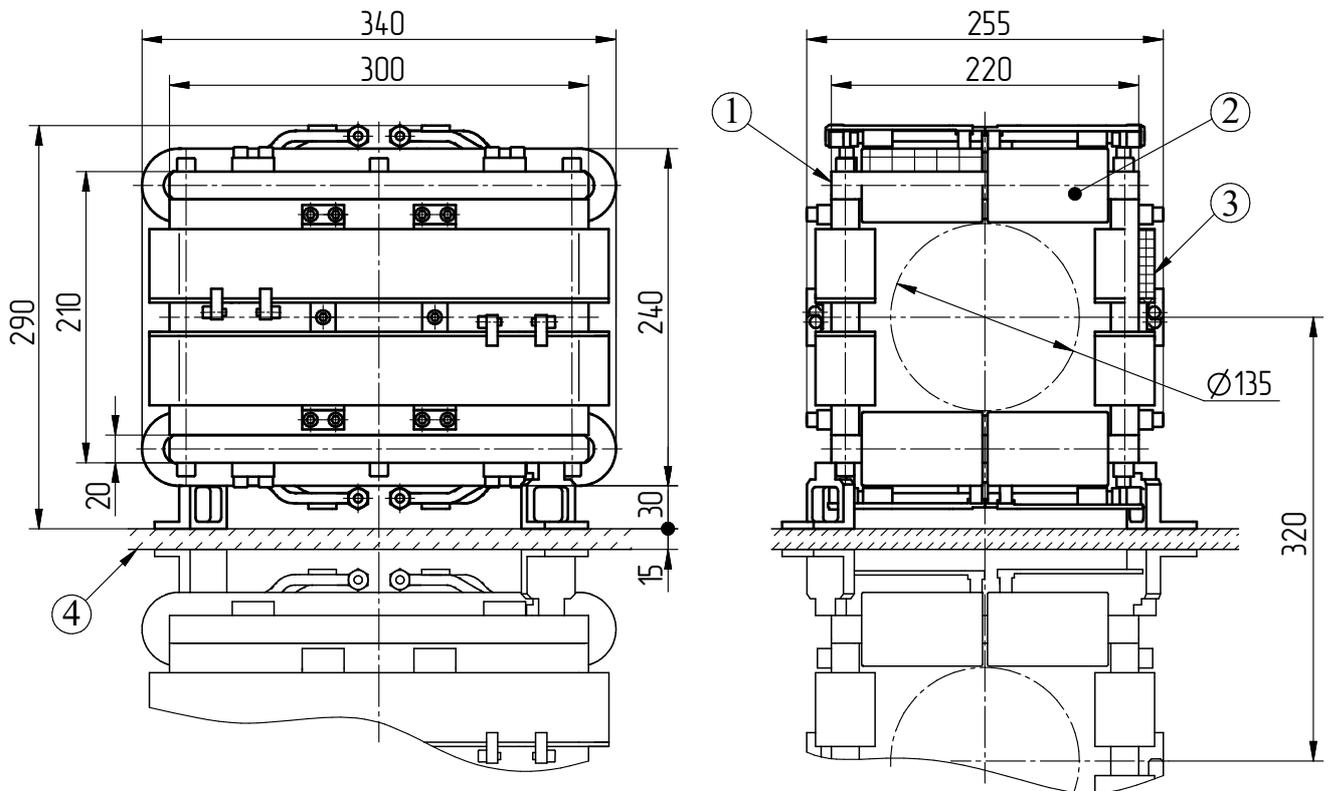


Рисунок 45 – Дипольный корректор ионного пучка

Известно, что магниты с O-образным сердечником – наиболее компактны и обладают широкой областью «хорошего поля», заполняющего практически все пространство между

обмотками [60]. Конструкция диполя при достаточно небольших размерах ярма 300 x 220 x 210 (мм) вмещает восемь обмотки сопоставимых размеров.

Таблица 13 – Техническая характеристика обмотки горизонтального поля корректора

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	15 x 86
Число витков (виток x слой)	20 (10 x 2)
Размеры сечения шинки, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3
Длина намотки шинки, $L_{\text{ш}}$, м	16,2
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	53 x 340 x 86
Сопротивление (20°C), мОм	5,81
Рассеиваемая мощность, Вт	1,2
Расход охладителя (вода, $\Delta T=15K$), л/мин	1,1
Падение давления охладителя, бар	6,8
Ток питания, А	440
Номер позиции (рисунок 45)	2

Таблица 14 – Техническая характеристика обмотки вертикального поля корректора

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	10 x 53
Число витков (виток x слой)	136 (17 x 8)
Марки проводника	ПСДТ
Сечение проводника, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	90,3
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	43 x 329 x 53
Сопротивление (20°C), Ом	0,645
Рассеиваемая мощность, Вт	23,2
Ток питания, А	6
Номер позиции (рисунок 45)	3

При этом свободная апертура диполя получается равной 135 мм (рисунок 45), чего достаточно для размещения внутри магнита прогревной вакуумной камеры D_y 100 мм (D_n 104 мм) при толщине теплоизоляции около 15 мм. Однако для установки камеры внутрь диполя требуется его частичная разборка, связанная с тем, что наружный диаметр фланцев вакуумной камеры (152 мм) не позволяет просунуть камеру внутрь окна магнита. Но это следует относить не к недостаткам конструкции, а, скорее, к особенностям монтажа и эксплуатации соответствующего оборудования. Причем, учитывая небольшие размеры камеры дипольного корректора (габаритная длина чуть менее 480 мм, вес (без заглушек и изоляции) 5 кг), возможно производить транспортировку и хранение магнитов в сборе с вакуумной камерой, что упрощает монтаж изделий на установке.

Техническая характеристика корректора приведена в таблице 15.

Таблица 15 – Техническая характеристика дипольного корректора ионного пучка

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	горизонтальное	вертикальное
Направление магнитного поля обмоток	горизонтальное	вертикальное
Число обмоток, шт	4	4
Ток питания, А	440	6
Сопротивление, Ом	0,023	2,6
Рассеиваемая мощность, кВт	4,8	0,016
Расход охладителя (вода, $\Delta T=15K$), л/мин	4,7	-
Падение давления, бар	6,8	-
Вес магнита, кг	79	
Габаритные размеры магнита, В x L x Н, мм	255x340x290	

2.2 Тороид

Следующим элементом по ходу движения ионного пучка будет тороид – элемент, в котором происходит совмещение (разведение) ионного пучка с электронным. Для установок электронного охлаждения, использующих гомогенное магнитное поле для транспортировки электронного пучка, применяются соленоиды различных конфигураций, в том числе поворотные (тороиды), однако в данной работе выделяется «тороид» («TOR») именно как поворотный соленоид (комбинация соленоидов) в месте ввода ионного пучка, в то время как соленоиды поворотных участков электронного пучка называются «BEND» (или поворот).

Компоновочное решение конструкций тороидов определяется взаимным расположением участка охлаждения относительно транспортных линий электронного пучка, и здесь можно выделить два варианта конфигураций (рисунке 46).

Вариант компоновки, при котором электронный пучок не перпендикулярен участку охлаждения (рисунке 46, б), использовался на установках электронного охлаждения НАП-М [6], SIS [61], COSY [28]. Такой вариант интересен тем, что позволяет сократить протяженность транспортных соленоидов, устанавливая пушку и коллектор с небольшим транспортным соленоидом непосредственно на короткий поворот (с углом поворота, грубо, менее 45°).

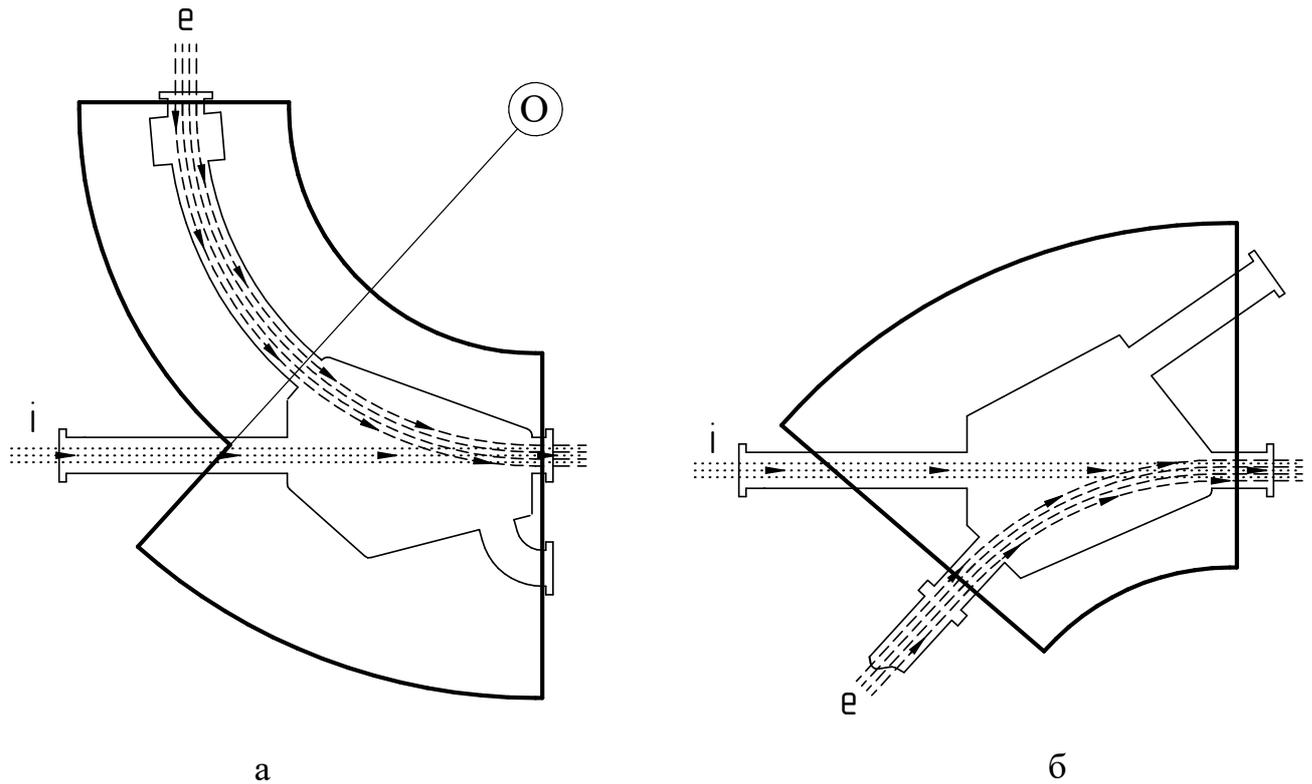


Рисунок 46 – Компоновочные варианты тороидов:

а) радиально-разъемный корпус; б) не разъемный корпус

В большинстве установок электронного охлаждения используется решение, в котором транспортный участок перпендикулярен участку охлаждения (рисунке 46 а). В таком варианте тороид, как правило, расположенный вертикально, служит опорой для соленоидов пушки и коллектора. Корпус тороида делят на две части (линия через точку «О», рисунок 46 а), что при последовательной сборке позволяет установить внутри поворота вакуумную камеру. В точке «О» при этом может быть размещен шарнир, позволяющий ограничить все линейные перемещения верхней части тороида, что упрощает сборку установки. Такое решение было реализовано в конструкциях СЭО бустера NICA [62] и охладителях HIRFL-CSR: EC-35 [37], EC-300 [38]. В компактных установках вдоль плоскости разъема, как правило, делается только

фланец для болтового соединения частей между собой, как в установках охлаждения ELENA [32], или S-LSR [34].

В нашем случае тороид имеет компоновку по схеме с перпендикулярным транспортным каналом (рисунок 46 а), но располагается не вертикально, а горизонтально и при этом, так же как и соленоид охлаждения, состоит из верхнего и нижнего каналов, что потребовало ряда новых конструктивных решений.

Общее устройство тороида¹ показано на рисунке 47, где с внешней стороны корпуса (1) установлены: дипольный корректор ионного пучка (2), коллектор системы охлаждения (3а) и фиксирующий зажим ввода охлаждающей жидкости (3б). На торцевой стенке корпуса (1) со стороны соленоида охлаждения размещен силовой разъем ввода питания (6) основных обмоток (7) верхнего и нижнего каналов и площадка для размещения клеммных колодок цепи термоключей (10). Электрическая коммутация обмоток выполняется ошиновкой (4), удерживаемой изоляторами (5). После окончательной сборки электрическая коммутация тороида защищается изоляционными кожухами (15).

Ведущее поле тороида формируется 30-ю единичными обмотками (основными обмотками), внешний вид которых изображен на рисунке 48. Обмотки выполнены в двух типоразмерах: «короткие»² и «длинные»³. Все они базируются по внутренней стенке корпуса (1) тороида, на которой установлены гребенки (11а)⁴. С противоположной стороны (по внешней стенке тороида) устанавливаются распорки (11б), регулирующие угол расстановки обмоток. Угол сектора, в котором расположены «длинные» обмотки равен 42° , а полный угол поворота равен 90° .

Со стороны транспортного канала на тороиде находятся площадки питания (9а, рисунок 47) основной обмотки сборки поворотного поля (8) и колодки (9б) обмоток коррекции, находящихся в той же сборке. Обмотки поворотного поля (рисунок 49) в каждом канале размещаются парами на верхней и нижней стенках внутри корпуса.

Внутри окна обмоток (7, рисунок 47), высота которого равна 165 мм, располагается вакуумная камера (12), которая крепится на торцевых стенках корпуса (1) при помощи радиальных зажимов (13а), а внутри (по линии разреза А-А) – закреплена на винтовой стойке (13б)⁵. Такое устройство креплений обеспечивает требуемую при прогреве подвижность камеры (12) за счет фиксации «на трении» участков наибольшего линейного перемещения.

¹ Фотография готового изделия приведена на рисунке Б.4.

² Располагаются в части корпуса с внешним радиусом 1305 мм (рисунок 47).

³ Располагаются в части корпуса с внешним радиусом 1705 мм (рисунок 47).

⁴ Гребенка определяет базовую опорную поверхность обмоток радиусом 765 мм и шаг между обмотками на этой поверхности в соответствии с их угловым шагом расстановки.

⁵ За счет применения винта обеспечена возможность устранения непараллельности камеры к корпусу тороида.

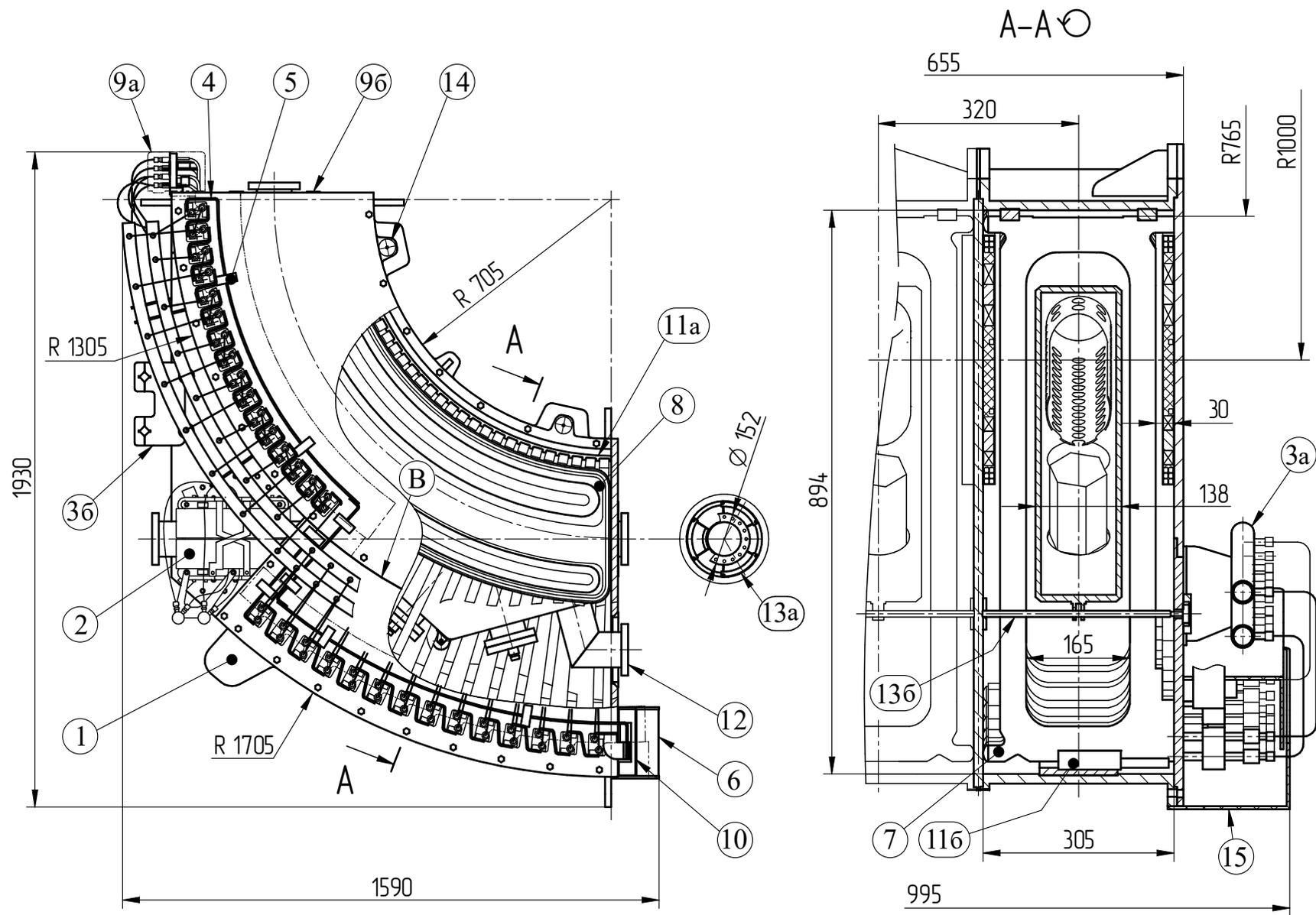


Рисунок 47 –Тороид. Общий вид

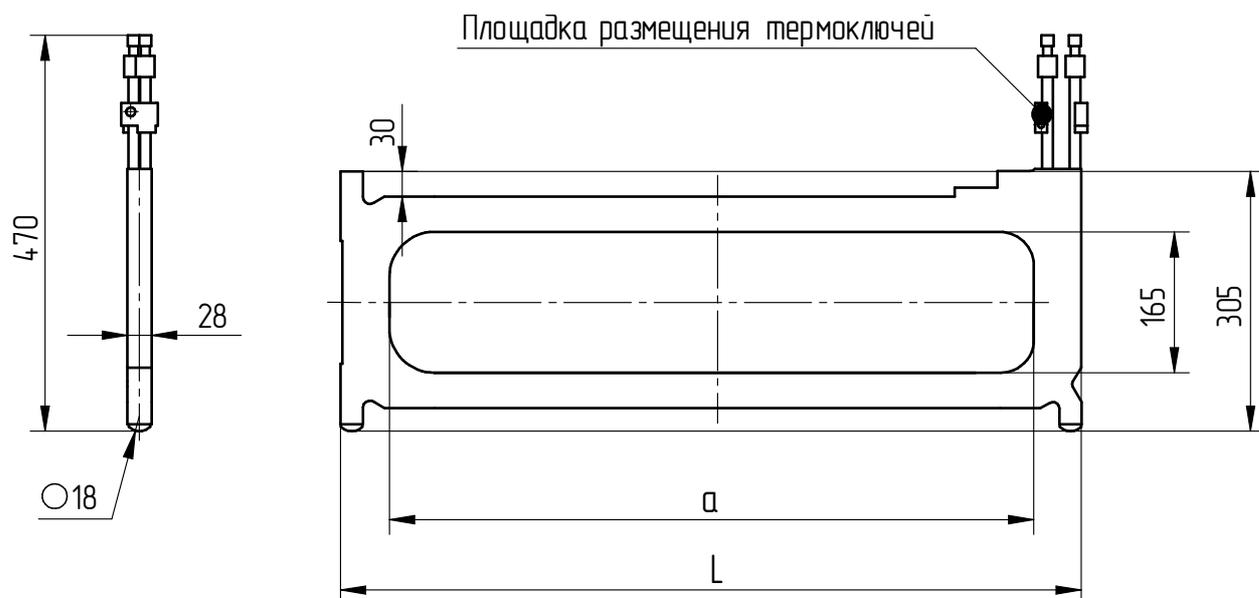


Рисунок 48 – Основные обмотки тороида

Для установки тороидов в проектное положение с применением лазерного трекинга на корпусе выполнены места для установки геодезических меток (14). Техническая характеристика тороида приведена в таблице 16.

Таблица 16 – Техническая характеристика тороида

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	продольного поля	поворотного поля
Тип обмоток (без корректоров)		
Число в одном канале ¹ , шт	30	2
Шаг расстановки обмоток	3°	-
Ток питания, А	710	295
Сопротивление обмоток на канал, (20°С) Ом	0,031	0,018
Радиус орбиты электронного пучка, мм	1000	
Рассеиваемая мощность на канал (общая), кВт	15,6 (31,2)	
Расход охладителя на канал (общий), вода, л/мин	21,6 (43,3)	
Падение давления охладителя, бар ²	0,89	
Вес, кг	2320	
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	1930x1590x1350	

¹ В каждом канале тороида размещаются по 14 больших обмоток (L=865 мм) и по 16 маленьких (L=470 мм).

² При перепаде давления 5,7 бар, обеспечивающем номинальный тепловой режим обмотки поворотного поля, расчетный расход охладителя составляет 55,4 л/мин на канал, 110 л/мин – общий.

Главным отличием от тороида, который разрабатывался для СЭО бустера NICA [62] и был выполнен по такой же компоновочной схеме (рисунок 46, а) с разделением корпуса на два сектора с углом в 40° и 50° , стало то, что в конструкции «тороида бустера» использовался электростатический поворот [63], дополненный магнитной коррекцией с поперечным полем. Обмотки коррекции, выполненные отдельно, были закреплены на боковых поверхностях внутри корпуса. Ось вращения («О», рисунок 46) была ориентирована горизонтально, а плоскость разъема – наклонена.

В конструкции тороида коллайдера применяются поворотные обмотки (8, рисунок 47) с интегрированными в них корректорами, занимающие весь угол тороида (90°), общий вид которых приведен на рисунке 49. Наличие таких поворотных обмоток, в том числе привело к отказу от разъема корпуса по плоскости разделения секторов (с вращением секторов) в виду значительного усложнения конструкции ¹.

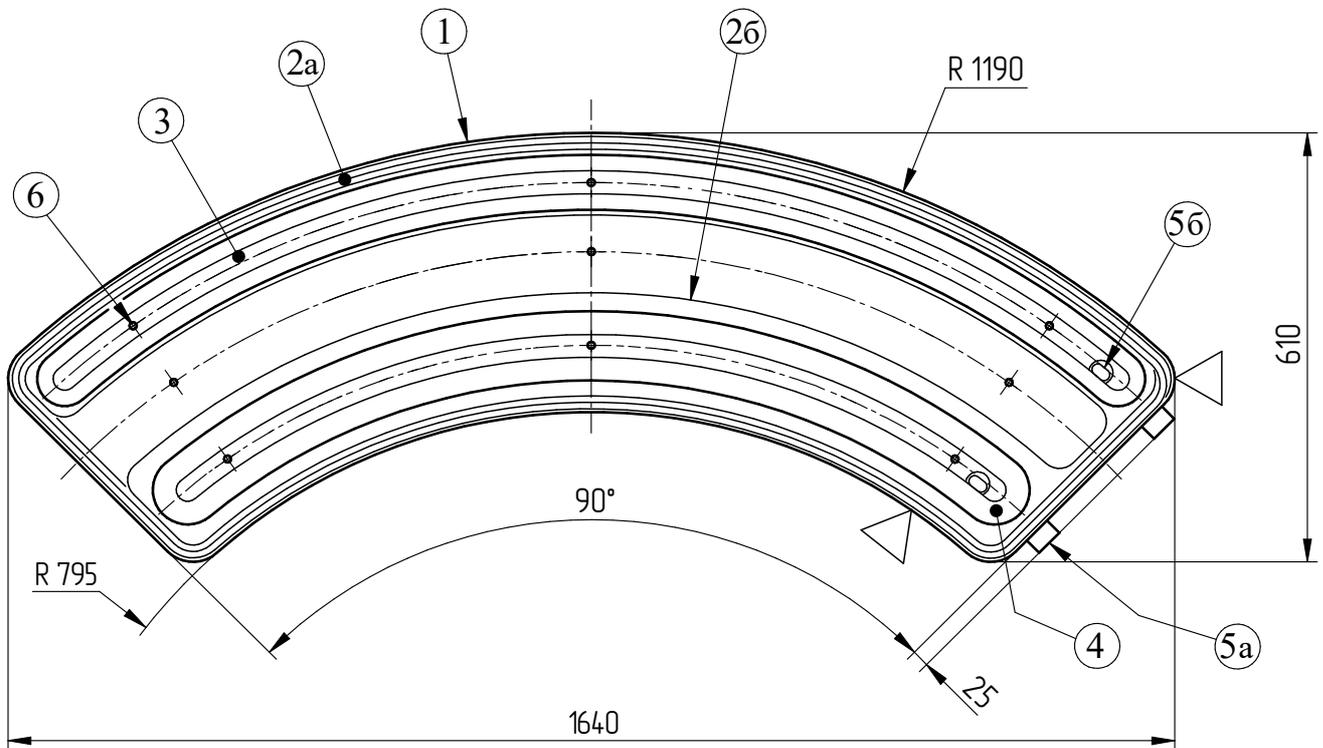


Рисунок 49 – Сборка обмоток поворотного поля

¹ Во внимание принимались такие факторы как: 1) проблема контроля положения поворотных обмоток (рисунок 49), особенно внутренних (размещенных на перегородке), при разъеме угловым поворотом, что с учетом появления даже небольших перекосов может привести к повреждению обмотки; 2) значительное усложнение конструкции за счет того, что ось поворота в данном положении находится вертикально, что как минимум требует разработки системы противовесов, иначе разъем секторов тороида будет вызывать перекосы; 3) даже в случае реализации первых двух условий, поворотные обмотки без их снятия будут перекрывать место разъема с верху и снизу. Другими словами, частичная разборка элементов изделия практически неизбежна.

Чтобы компенсировать отсутствие разъема секторов тороида, минимизировав при этом число элементов, снятие которых необходимо произвести для доступа и установки вакуумной камеры, была предусмотрена возможность сдвигания обмоток внутри корпуса. При сдвигании обмотка (7, рисунок 47) выводится из зацепления с гребенкой (11а), для чего со стороны площадки с распорками (11б) оставлен зазор; после этого обмотки можно сдвинуть к внешнему краю или к границе разделения секторов, верхние крышки и коммутирующая ошиновка при этом должны быть сняты. Для облегчения перемещения опорные пятки основных обмоток тороида выполнены из бронзы. А распорки (11б, рисунок 47 – две щеки с центральным клином, которые затягиваются винтом с наружи корпуса через отверстие в его стенке) имеют специальную державку для их извлечения и установки при снятых верхних крышках. Недостатком данной конструкции является необходимость кантования (переворачивания) тороида с установленной вакуумной камерой одного из каналов для установки вакуумной камеры второго канала. Для минимизации операций кантования установку камер лучше начинать с нижнего канала.

Корпус тороида (1, рисунок 47) выполнен разборным, средняя стенка, крышки и фланцы (торцевые стенки со сторон транспортного канала и соленоида охлаждения) которого выполнены из стального листа (сталь 10) без применения сварки. Две внутренних и четыре внешних стенки-сектора, как и стенки, расположенные со стороны диполя – сварные конструкции, в которых имеются приварные бортики, используемые для установки болтов. Стенки дополнительно усилены ребрами жесткости в местах размещения опор. Верхняя и нижняя крышки корпуса разделены по линии «В» (рисунок 47) для того, чтобы упростить установку (как и возможность снятия) обмотки поворотного поля (8), крепление которой находится с внутренней стороны корпуса. Так же частичная разборка крышек позволяет обеспечить хотя бы минимальную видимость и частичную доступность вакуумной камеры в процессе ее установки.

Как уже отмечалось, основные обмотки тороида изготавливаются в двух исполнениях, отличающихся размерами (L, а – рисунок 48). Их намотка производится проводником квадратного сечения с круглым каналом для охлаждающей жидкости, пропитка – эпоксидным компаундом горячего отверждения. Опорные площадки выполняются при помощи обрабатываемых после отверждения компаунда закладных из стеклотекстолита, скрепленных с намотанным проводником. Затем к ним прикручиваются бронзовые опорные пятки со сферической поверхностью (радиусом 18 мм). Техническая характеристика обмоток приведена в таблице 17.

Как видно из таблицы 17, «короткая» обмотка имеет приблизительно в 2 раза меньшую потребность в охладителе и для выравнивания теплогидравлического режима тороида гидравлические контуры этих обмоток собираются последовательными парами, такой контур при давлении в 0,89 бар обеспечивает расход охладителя, приближающийся к 1 л/мин, обеспечивая хорошую согласованность контуров охлаждения основных обмоток тороида.

Таблица 17 – Техническая характеристика обмоток продольного поля тороида

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	большая (L=865 мм)	меньшая (L=470 мм)
Форма сечения обмотки	прямоугольная	
Размеры сечения по изоляции, $L_{сеч} \times H_{сеч}$, мм	27 x 40,6	
Число витков (виток x слой)	6 (3 x 2)	
Размеры сечения шинки, $l_{ш} \times h_{ш} - d_{отв}$, мм	12,5 x 12,5 - d4	
Длина намотки шинки, $L_{ш}$, м	11,0	6,3
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	28 x 865 x 305	28 x 470 x 305
Сопротивление (20°C), мОм	1,34	0,77
Рассеиваемая мощность, Вт	706	405
Расход охладителя (вода, $\Delta T=10K$), л/мин	1,0	0,58
Падение давления охладителя, бар	0,89	0,2
Ток питания, А	710	

Сборка обмоток поворотного поля конструктивно более интересна – это конструкция с плоскими обмотками, выполненная в 90° секторе окружности (рисунок 49). Сечение основной (водоохлаждаемой) обмотки (2а) содержит 6 витков, но внутри контура, образованного этими витками, добавлен обратный виток (2б), необходимый для формирования градиента поля со спадом (~0,5; рисунок 50). Обратный виток уложен во втором, располагающемся ближе к оси пучка, слое намотки. Для получения расчетного спада поля он выполнен со смещением относительно средней линии обмотки – в сторону внешнего радиуса (рисунок 49). Намотка производится из проводника прямоугольного сечения с круглым каналом для охлаждения.

В областях пустого пространства между обратным витком и основным контуром водоохлаждаемой обмотки (рисунок 49) располагаются корректирующие обмотки (3, 4), наматываемые из сплошного проводника прямоугольного сечения (7x1 мм) на немагнитном сердечнике, выполненном из дюралевого сплава (Д16Т). Выбор материала сердечника обусловлен улучшением теплоотвода от корректирующих обмоток на корпус тороида. Так как ширина проводника не располагает к аккуратному формированию перехода со одного слоя на

другой¹ – слои соединяются между собой через пропаянное контактное соединение (5б). Подключение обмоток коррекции осуществляется через контактные колодки (5а).

Все обмотки собираются в едином изоляционном корпусе, выполненном из стеклотекстолита (1, рисунок 49), таким образом, чтоб контактные поверхности металлических сердечников обмоток (3, 4) немного выступали за поверхность корпуса сборки обмоток. Такое выступание сердечников обеспечивает хороший тепловой контакт с корпусом тороида, крепление к которому производится при помощи винтов по отверстиям (6).

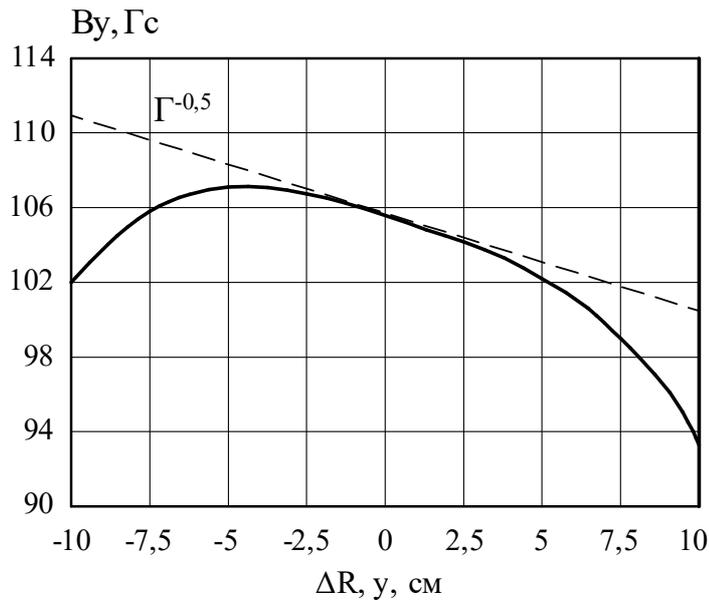


Рисунок 50 – Поворотное поле

Треугольниками (на рисунке 49) обозначены места выхода выводов основной обмотки, отличающиеся для разных исполнений сборки (для тороида и поворота). Сборки обмоток изготавливаются зеркальными парами (с левой и правой намоткой), пропитка выполняется эпоксидным компаундом горячего отверждения. Техническая характеристика обмоток приведена в таблице 18.

Гидравлический контур охлаждаемая сборки обмоток поворотного поля подключается к общему коллектору, установленному для каждого канала основных обмоток тороида. Однако необходимый гидравлический режим этих обмоток отличается, и при давлении охладителя в 0,89 бар его расход установится на уровне 0,3 л/мин, что неизбежно приведет к нагреву обмотки (максимальный расчетный нагрев составляет 45°C) и увеличению рассеиваемой мощности (до 950 Вт). Но учитывая то, что рабочая температура не превышает максимально допустимую

¹Намотка производится таким образом, что витки располагаются по толщине сечения шинки, а высота, значительно превышающая толщину сечения проводника, не позволяет получить переход с малыми радиусами гибки на участке соизмеримом с толщиной обмотки. Короткий переход будет стараться согнуться по толщине, а не по высоте шинки, формируя перегибы или заломы.

температуру, выдерживаемую компаундом (до 78°C [43]) и то, что теплоотвод на корпус тороида целенаправленно увеличивался, данный режим работы обмоток поворотного поля можно допустить. А учитывая, что общие потери давления охладителя в основных обмотках тороида не велики, то, поднимая давление до величины около 5,1 бар, данного нагрева поворотных обмоток можно избежать при небольшом локальном (по потребности основных обмоток тороида) перерасходе охладителя.

Таблица 18 – Техническая характеристика обмоток поворотного поля тороида

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ		
	Основная	Коррекция 1	Коррекция 2
Форма сечения обмотки	прямоугольная		
Размеры сечения (по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$), мм	27,4 x 16	22,5x16	33 x 16
Число витков (виток x слой)	6+1 ¹	32 (16 x 2)	44 (22 x 2)
Марка проводника	Luvata	ПСДТ	
Сечение провода ПСДТ, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	-	1,4x7,5 (1,0x7,1)	
Сечение шинки Luvata, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3	-	
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	26	101,7	117,1
Габаритные размеры ² , В x L x Н, мм	610x1640x21	355x1555x16	301x1230x16
Сопротивление (20°C), Ом	0,009	0,258	0,297
Рассеиваемая мощность, Вт	860	83,6	96,2
Расход охладителя (вода, $\Delta T=15\text{K}$ (45K)), л/мин	0,8 (0,3)	-	
Падение давления охладителя ($\Delta T=15\text{K}$ (45K)), бар	5,7 (0,89)	-	
Ток питания, А	295	18	
Номер позиции (рисунок 49)	2а, 2б	3	4

2.3 Согласующая секция 1-2 кГц

В согласующие секции МАТЧН помимо прямого (физического) назначения, заключающегося в согласовании магнитного поля транспортных соленоидов и соленоида охлаждения в соответствии с графиком (на рисунке 44) таким образом, чтобы это не приводило

¹ Первый слой обмотки содержит 3 витка, второй слой содержит 3 основных витка и 1 дополнительно намотанный обратный виток, ослабляющий магнитное и обеспечивая расчетный спад поля (рисунок 49).

² В сборе корректор имеет габаритные размеры 610 x 1940 x 21,3 ($B_{\text{сб}} \times L_A \times H_{\text{сб}}$, мм), при весе около 40 кг.

к нагреву электронного пучка, вложена технически важная функция – завершающего звена сборки систем¹ участка охлаждения. Конструкция секции² обеспечивает доступ к вакуумным соединениям, располагающимся внутри секции. Так, для монтажа сильфонных узлов (3, рисунок 51), замыкающих вакуумные камеры верхнего и нижнего каналов установки, в процессе сборки секции обеспечивается необходимое свободное пространство. Согласующая секция спроектирована таким образом, что возможно производить снятие деталей корпуса (4) при уже установленных основных обмотках (5), обеспечивая при этом проход «поджатого» сильфонного узла в промежутке, составляющем 245 мм между обмотками.

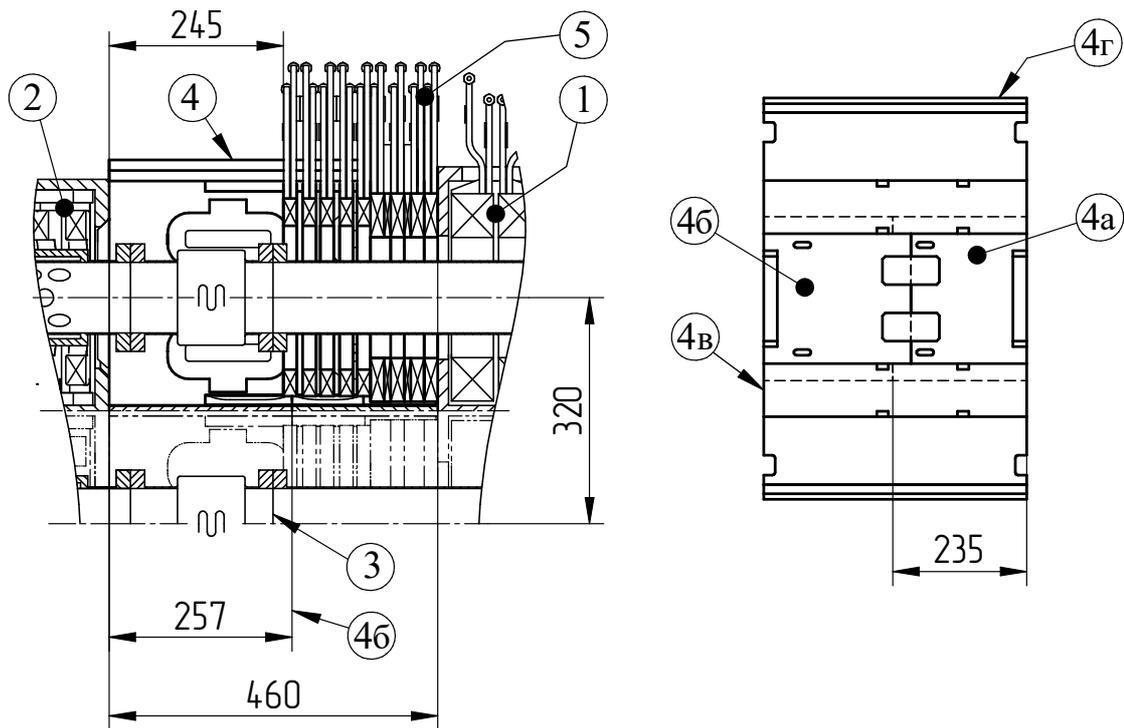


Рисунок 51 – Слева - устройство согласующей секции (обмотки сдвинуты), справа – корпус

Конструкцией предусмотрена возможность полной разборки части корпуса (4б, рисунок 51), что позволяет освободить пространство длиной 257 мм между соленоидом охлаждения (1) и тороидом (2). В обозначенном промежутке остается только часть (4а), закрепленная на соленоиде охлаждения (1). При этом обмотки (5), формирующие продольное поле, могут быть свободно перемещены вдоль направляющих пазов, выполненных по всей длине корпуса (4).

Возможность перемещения обмоток обеспечивается тем, что стыковка корпусных деталей (4а и 4б рисунок 51, корпус), выполненная по ломанной линии, которая выступает в «свободную» область на 235 мм, не нарушает прямолинейности пазов (направляющих)

¹ Основные системы, сборка (либо вывод цепей) которых осуществляется в данном месте, это: магнитная система, вакуумная система, система диагностики пучка, прогрев вакуумных камер.

² Фотографии готового изделия в сборе с секциями соленоида охлаждения приведены на рисунках Б.2 и Б.3.

удерживающих обмотки (5). За счет этого выступания предотвращается сваливание крайней из сдвинутых обмоток на вакуумную камеру. Сборка всех корпусных деталей секции производится за счет резьбовых соединений, замыкание корпуса в местах крепления обмоток и выводов осуществляется накладками (4в, 4г).

Задача обеспечения требуемого изменения магнитного поля (рисунок 44) и необходимости корректировки положения электронного пучка в изменяющемся поле, не приводящих к нагреву электронного пучка, приводит к тому, что на участке согласования приходится использовать наборы электрических обмоток с разнообразными параметрами. Такие наборы обмоток позволяют добиться необходимой точности при регулировании магнитного поля в широком диапазоне требуемых рабочих энергий электронного пучка.

На данном участке располагается 9 обмоток (5-ти различных типов)¹, формирующих продольное поле (рисунок 52), и 20 сборок коррекции (рисунок 53), которые можно поделить на 6 различных типов. Однозначность расположения обмоток полностью обеспечивается конструкцией корпусов секций и соответствует изображениям, приведенным на рисунках 52 и 53². Так, шаг расстановки обмоток продольного поля задается пазами, выполненными в съемных крышках корпуса, что не препятствует перемещению обмоток при разборке корпуса.

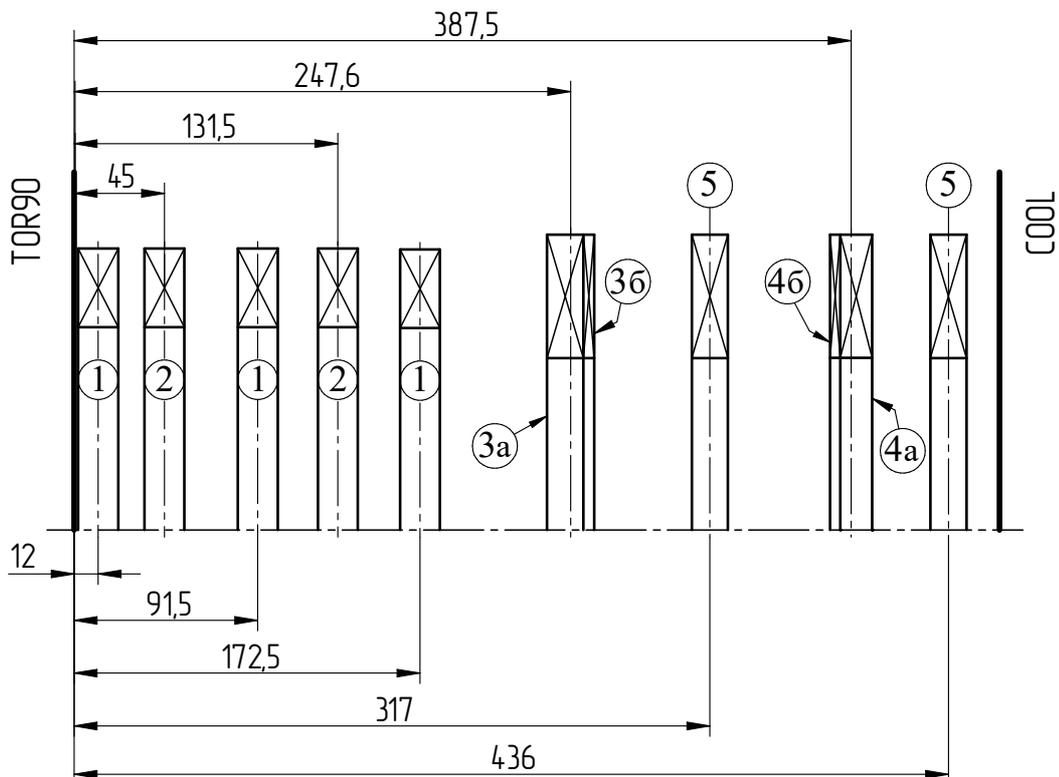


Рисунок 52 – Расстановка обмоток продольного поля согласующей секции

¹ Число типов обмоток можно считать равным трем, с оговоркой, что варианты 1 и 3 (а, б) имеют по два исполнения (2 и 4 отличаются левым и правым направлением намотки), а остальные характеристики не меняются.

² На перечисленных рисунках: TOR90 – торцевая пластина тороида; COOL – соленоида охлаждения.

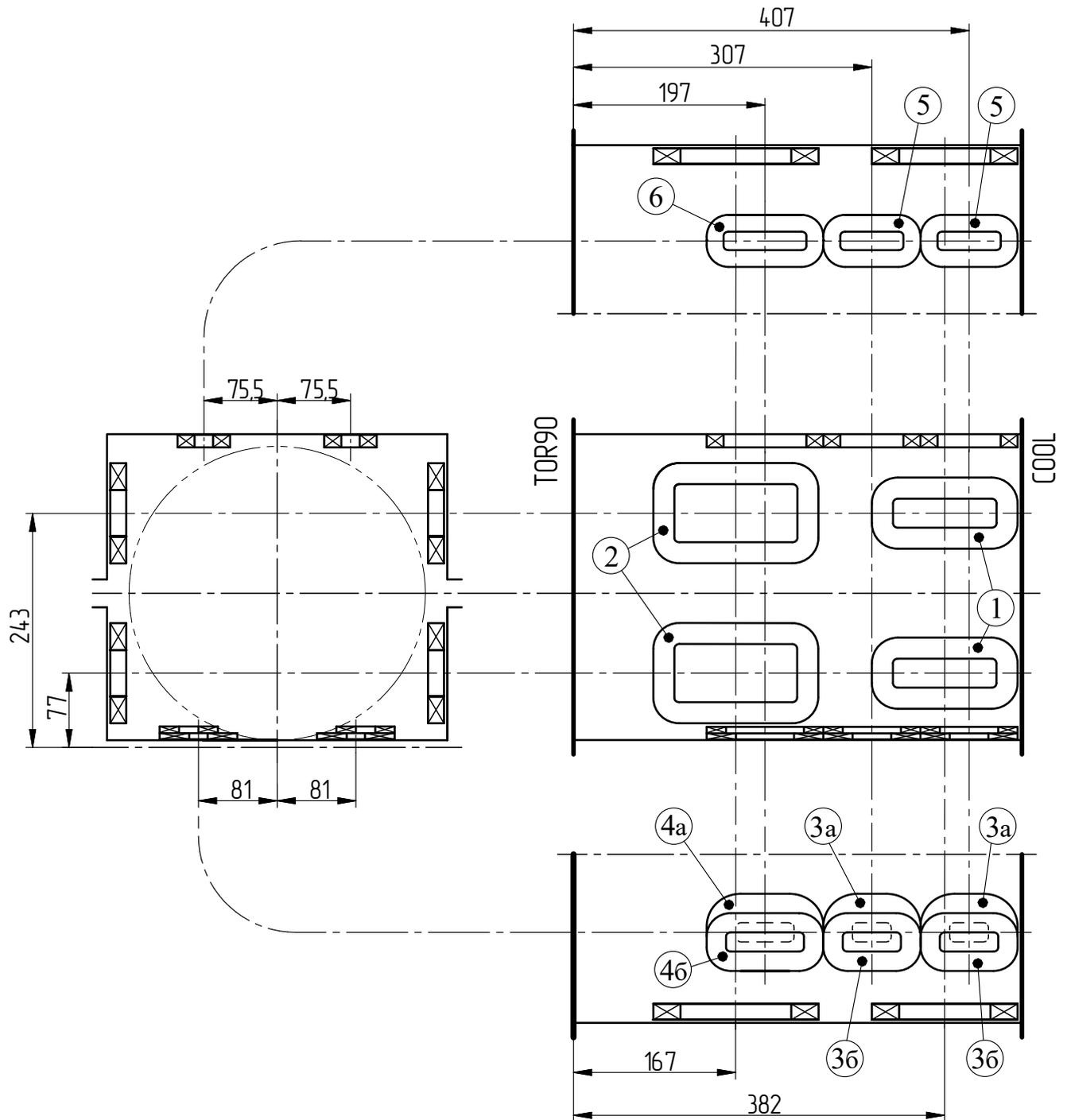


Рисунок 53 – Расстановка корректирующих сборок согласующей секции

В отличие от сдвигаемых обмоток продольного поля, корректирующие обмотки горизонтального и вертикального поля жестко зафиксированы на внутренних поверхностях составных частей корпуса согласующей секции (4, рисунок 51), при частичной разборке которого обмотки, расположенные на соответствующих съемных элементах, убираются вместе с ними и не требуют проведения дополнительных операций их снятия (установки), за исключением снятия коммутационных электрических соединений.

Техническая характеристика обмоток продольного поля приведена в таблице 19.

Техническая характеристика корректоров вертикального поля приведена в таблице 20.

Таблица 19 – Техническая характеристика обмоток продольного поля согласующей секции

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ						
	1	2	3а	4а	3б	4б	5
Номер позиции (рисунок 52)							
Направление намотки	правое	левое	правое	левое	правое	левое	правое
Форма сечения обмотки	прямоугольная						
Размеры сечения по изоляции, $L_{сеч} \times H_{сеч}$, мм	19 x 40		19 x 61,6		8,7 x 58,9		19 x 61
Число витков (виток x слой)	10 (5 x 2)		16 (8 x 2)		88 (44 x 2)		16 (8 x 2)
Марка проводника	Luvata			ПСДКТ			Luvata
Сечение провода ПСДКТ, $l_p \times h_p$ (по меди), мм	–			1,34 x 4,33 (1,0 x 4,0)			–
Сечение шинки Luvata, $l_{ш} \times h_{ш} - dotв$, мм			7 x 8 - d3				7 x 8 - d3
Длина намотки проводника, L_p , м	9,1		13		63,5		13
Габаритные размеры, В x L x H, мм	20 x 400 x 472		28,2 x 400 x 480			20 x 400 x 480	
Вес, кг	3,9			8,0			5,6
Сопротивление (20°C), МОм	3,26		4,66		286		4,66
Рассеиваемая мощность, Вт	685		941		92,7		941
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5K$ ($\Delta T=7K$)), л/мин	0,76 (1,26)		1,1		–		1,1
Падение давления охладителя ($\Delta T=12,5K$ ($\Delta T=7K$)), бар	1,76 (4,77)		4,8		–		4,8
Ток питания, А	439		439		18		439

Таблица 20 – Техническая характеристика корректоров вертикального поля согласующей секции

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ					
	3а	3б	4а	4б	5	6
Номер позиции (рисунок 53)	3а	3б	4а	4б	5	6
Число одинаковых обмоток в сборке	1	1	1	1	2	
Форма сечения обмотки	ступенчатая			прямоугольная		
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	30x6,3	20x6,3	30x6,3	20x6,3	17,5x6,3	17,5x6,3
Число витков обмотки (виток x слой)	48(24x2)	32(16x2)	48(24x2)	32(16x2)	28(14x2)	28(14x2)
Число витков общее	80		80		56	56
Марка проводника	ПСДТ					
Сечение проводника, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)					
Длина намотки проводника обмотки, $L_{\text{п}}$, м	9,9	6,9	11,8	8,1	6x2	7,1x2
Габаритные размеры сборки, В x L x Н, мм	98,5 x 100 x 15		98,5 x 120 x 15		72,5 x 100 x 15	72,5 x 120 x 15
Сопротивление обмотки (20°C), мОм	71	49	84	58	43	51
Сопротивление сборки (20°C), Ом	0,120		0,142		0,086	0,102
Рассеиваемая мощность, Вт	4,3		5,1		3,1	3,7
Ток питания, А	6		6		6	6

Техническая характеристика корректоров горизонтального поля приведена в таблице 21.

Техническая характеристика согласующей секции приведена в таблице 22.

Таблица 21 – Техническая характеристика корректоров горизонтального поля согласующей секции

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ			
	1		2	
Номер позиции (рисунок 53)	1		2	
Число одинаковых обмоток в сборке	2		2	
Форма сечения обмотки	прямоугольная			
Размеры сечения по изоляции, $L_{сеч} \times H_{сеч}$, мм	25 x 6,3		25 x 6,3	
Число витков обмотки (виток x слой)	40(20x2)	40(20x2)	40(20x2)	40(20x2)
Число витков общее	80(20x4)		80(20x4)	
Марка проводника	ПСДТ			
Сечение проводника, $l_{п} \times h_{п}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)			
Длина намотки проводника обмотки, $L_{п}$, м	12,7	12,7	14,3	14,3
Габаритные размеры сборки, В x L x Н, мм	92,5 x 150 x 15		92,5 x 170 x 15	
Сопротивление обмотки (20°C), мОм	91	91	102	102
Сопротивление сборки (20°C), Ом	0,182		0,205	
Рассеиваемая мощность сборки, Вт	6,5		7,4	
Ток питания, А	6		6	

Таблица 22 – Техническая характеристика согласующей секции

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Число основных обмоток на канал (общее), шт	9 (18)
Число корректоров на канал (общее), шт	20 (40)
Сопротивление основных обмоток на канал, (20°C) мОм	35
Рассеиваемая мощность канала (общая), кВт	6,7 (13,5)
Расход охладителя на канал (общий), (вода, $\Delta T=12,5K$), л/мин	10,7 (21,4)
Падение давления охладителя, бар	4,77
Ток основных обмоток, А	439
Вес, кг	350
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	630x460x1100

Глава 3 Транспортировка электронного пучка

Для достижения результатов быстрого электронного охлаждения ионного пучка требуется не только формирование электронного пучка с определенным пространственным профилем частиц, определенной скоростью и температурой электронов, но и транспортировка такого пучка с сохранением его низкой температуры (и остальных параметров) к соленоиду охлаждения. Как уже отмечалось ранее – транспортная система установки электронного охлаждения коллайдера NICA построена на соленоидах с полем в 1 кГс. Из всех установок, которые когда-либо были изготовлены по такому принципу [5], она имеет самую протяженную длину транспортной системы (верхнее кольцо 23,9 м; нижнее кольцо 27,5 м – до фланцев соответствующих высоковольтных объемов, без учета согласующих секций (MATCH 1, 2 рисунок 54) и соленоида охлаждения (COOL)).

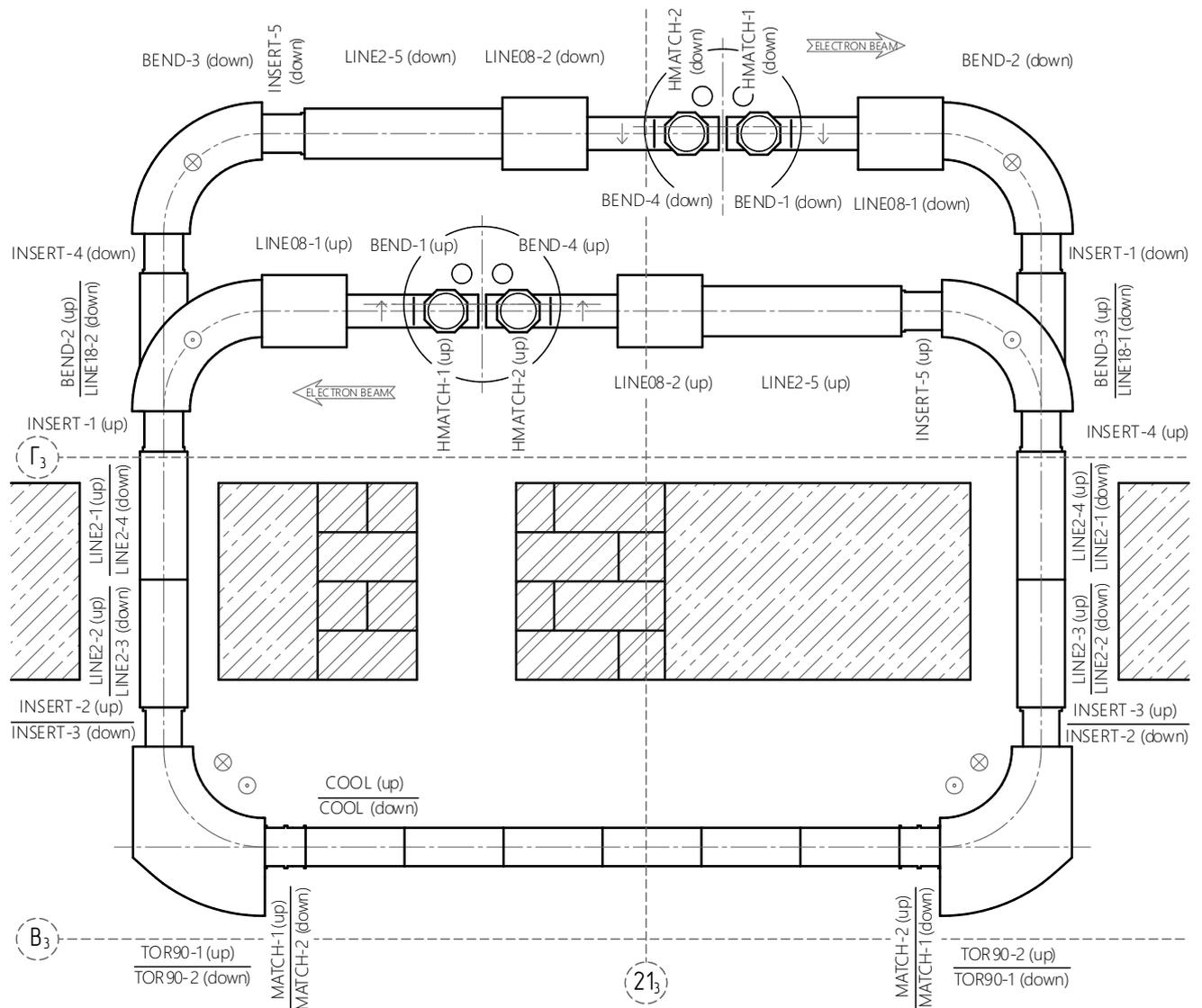


Рисунок 54 – Схема расположения элементов магнитной системы и радиационной защиты

Такое многочисленное количество элементов транспортной системы электронного пучка составляется из типовых элементов, которые можно обобщить по пяти основным группам:

- 1.1) 4 секции прямолинейного транспортного соленоида (LINE2), длина 1900 мм, верхний и нижний каналы объединены в одном корпусе¹, внутри располагаются корректоры уменьшающие ларморовское вращение по сечению пучка (galloping мода) с вращением фазы ларморовского движения в поворотах;
- 1.2) 2 удлиняющие секции прямолинейного транспортного соленоида (LINE18) нижнего канала, длина 1805 мм, устанавливаемые под поворотным соленоидом верхнего канала²;
- 1.3) 2 секции прямолинейного транспортного соленоида (LINE2-5), длина 1995 мм;
- 2.1) 6 поворотных соленоидов (BEND), радиус поворота 1 м³;
- 2.2) 2 поворотных соленоидов (BEND), радиус поворота 1 м, с измененной нижней стенкой, для установки на транспортный соленоид (пп.1.2)⁴;
- 3.1) 2 вставки (INSERT) транспортного канала, длина 405 мм, верхний и нижний каналы объединены в одном корпусе, внутри вставок размещены корректоры (EDIP) ларморовского вращения пучка как целого (дипольная мода);
- 3.2) 2 вставки (INSERT) транспортного канала, длина 405 мм, устанавливаются в верхнем канале после 2 секций прямолинейного соленоида (пп.1.1)⁴;
- 3.3) 4 вставки (INSERT) транспортного канала, длина 405 мм⁵;
- 4) 4 соленоида (LINE08), внутри которых размещаются откачные порты, вакуумные шиберы и корректоры (EDIP) ларморовского вращения пучка как целого, длина соленоида 855 мм, предусмотрена возможность уменьшения длины на 15 мм⁶;
- 5) 4 согласующих секции (HMATCH), устанавливаемых после (перед) ускоряющей (замедляющей) трубок, расположенных внутри высоковольтного объема⁷.

Отдельно в шестую группу элементов транспортной системы можно выделить дипольные корректоры (EDIP), с поправкой на то, что, размещаясь внутри соленоидов транспортной системы, они являются функционально самостоятельными устройствами.

Следует отметить, что существенное внимание при конструировании магнитной системы установки было уделено возможности технического доступа к элементам магнитной системы. Для чего в конструкции подставок бака и поворотных соленоидов между опорами

¹ Фотографии готовых изделий в сборе с сопрягаемыми частями приведены на рисунках Б.3 и Б.5.

² Фотографии готовых изделий в сборе с сопрягаемыми частями приведены на рисунках Б.8 и Б.9.

³ Фотографии готовых изделий приведены на рисунках Б.7..Б.9, Б.11 и Б.12.

⁴ Фотографии готовых изделий в сборе с сопрягаемыми частями приведены на рисунках Б.8 и Б.9.

⁵ Фотографии готовых изделий в сборе с сопрягаемыми частями приведены на рисунках Б.8, Б.9, Б.11 и Б.12.

⁶ Фотографии готовых изделий в сборе с сопрягаемыми частями приведены на рисунках Б.7, Б.11 и Б.12.

⁷ Фотографии готовых изделий приведены на рисунках Б.7.

предусмотрены проемы (обозначения: TANK-BEND-D и TANK-BEND-U, рисунок 55). Особое внимание в конструкциях подставок элементов было уделено расположению опор с тем, чтобы опорные площадки не попадали в технические каналы, выполненные в полу здания. Так же учитывалось положение опорных ригелей потолочного перекрытия помещения, на которые опираются бетонные плиты радиационной защиты. Положение ригелей при проработке конструкций СЭО потребовало корректировки для обеспечения сборки магнитной и высоковольтной части и размещения откачного вакуумного оборудования. Итоговое расположение ригелей должно соответствовать изображенному на рисунке 55.

Для обеспечения возможности установки транспортных соленоидов (LINE2) внутри проемов стены, отделяющей помещение ускорителей/рекуператоров (ВВ баков) СЭО от тоннеля ускорителя¹, были сконструированы гирдеры с рельсовыми линейными направляющими (фотография приведена на рисунке Б.6), аналогичные гирдеру соленоида охлаждения². Таким образом монтаж (такелажная установка элементов) всей системы транспортировки электронного пучка стал возможен из помещения ускорителей.

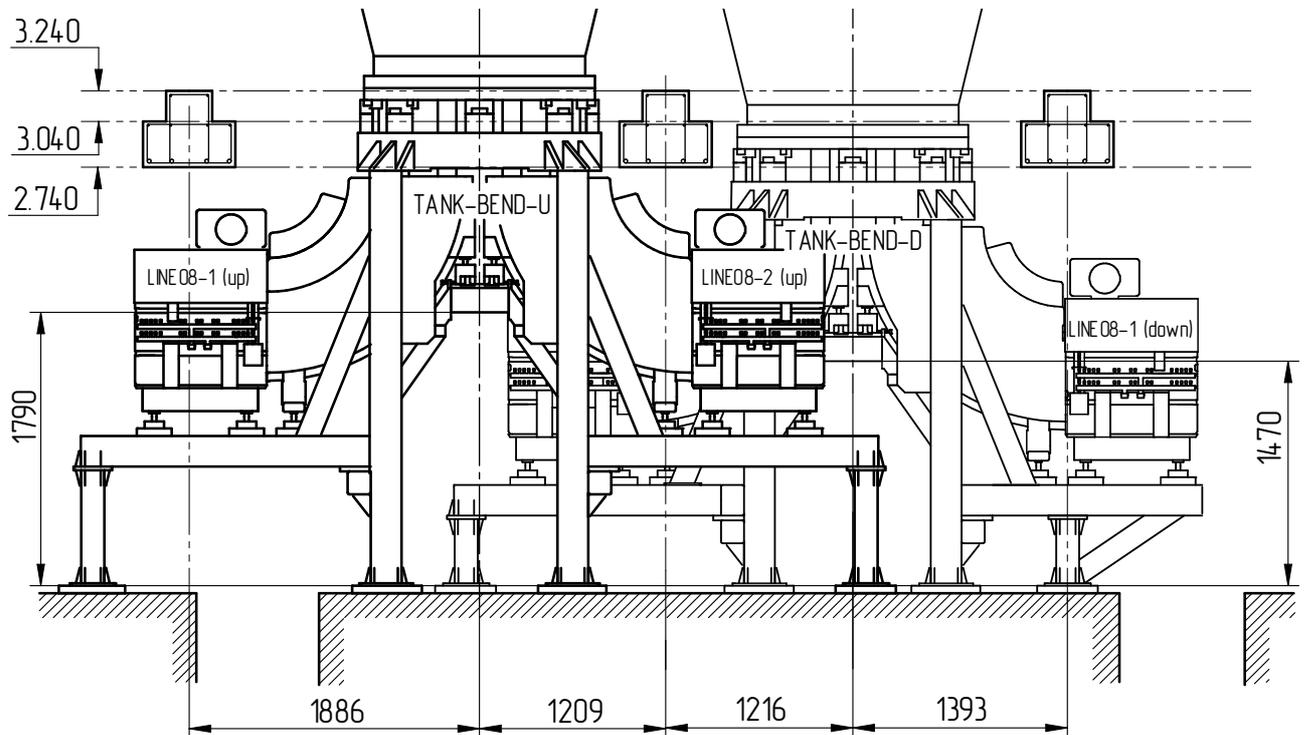


Рисунок 55 – Расположение опор высоковольтных баков: вид на опоры приведен со стороны соленоида охлаждения (отметки уровня приведены для опорных ригелей перекрытия)

¹ На ускорительном комплексе СЭО размещается в двух смежных помещениях (без учета помещений инженерных систем, систем питания и управления): в помещении ускорителей, расположенном выше оси Г₃ здания (рисунок 54), и тоннеле коллайдера NICA. Между помещениями располагается бетонная стена радиационной защиты, толщина которой равна 2 м (стена между осями В₃ и Г₃ здания). Проем в стене радиационной защиты, расположенный между транспортными соленоидами LINE2 установки, после монтажа СЭО закладывается.

² Места расположения двухканальных прямолинейных соленоидов LINE2 находятся не только внутри проема радиационной защиты, но и перед проемами имеется мертвая зона, недоступная для крана помещения ускорителей.

3.1 Поворотный соленоид

Как было замечено ранее, наиболее близкой к СЭО коллайдера NICA и прототипом для элементов транспортной системы электронного пучка установки стала установка охлаждения синхротрона COSY, в которой использовались аналогичные элементы магнитной системы, но требовали определенной степени проработки для новых условий работы. Так, например, по схожей схеме были выполнены поворотные соленоиды (bend1-bend6); прямолинейные соленоиды (line05, line17) и согласующие вставки (match1, match2) СЭО COSY [64].

По опыту, полученному при работе с элементами магнитной системы СЭО COSY, в конструкции нового поворотного соленоида BEND (рисунок 56, фотографии приведены на рисунках Б.7..Б.9, Б.11 и Б.12) были применены решения, направленные на существенное улучшение его механических и эксплуатационных характеристик, а именно: 1) увеличена жесткость корпуса, что позволяет осуществлять монтаж обмоток с обеих сторон (условные верх и низ), не требуя при этом промежуточной его сборки или каких-либо технологических приспособлений, удерживающих боковые стенки¹; другими словами, должна быть обеспечена возможность кантования корпуса с обмотками без верхней и нижней крышек; 2) коммутирующая пайка обмоток должна быть выполнена снаружи корпуса, что значительно упрощает возможность поиска и устранения дефектов пайки.

Для увеличения жесткости корпуса было проведено численное моделирование напряженного состояния корпуса и произведена оценки его деформаций. При моделировании использовалась упрощенная твердотельная модель несущего конструктива, состоящего из боковых стенок с направляющими (предназначенными для крепления обмоток) и торцевых фланцев корпуса. В качестве нагрузок учитывался полный вес обмоток и влияние собственного веса несущих частей корпуса. Моделирование велось итерационно, и после нескольких перерасчетов, первоначально выявивших неудовлетворительную жесткость внешней стенки поворота (которая попросту – скручивается), было показано, что с целью увеличения момента сопротивления кручению в верхней и нижней части боковых стенок следует выполнить ребра, сопротивляющиеся скручиванию. При этом фланцы поворота будут способны удерживать боковые стенки, не смотря на значительное их ослабление отверстием под вакуумную камеру.

¹ Конструкция корпусов поворотов СЭО COSY не позволяла осуществлять монтаж обмоток без промежуточных сборок и разборок: требовалось собрать 2/3 корпуса (днище и боковые стенки с направляющими), установить половину (от общего числа) обмоток, замкнуть корпус (установить крышку), осуществить его кантование на другую сторону, снять днище, установить вторую половину обмоток, и только после этого корпус можно было собрать окончательно. При этом вся коммутационная пайка выполнялась в процессе установки обмоток, а паяные соединения были расположены внутри корпуса.

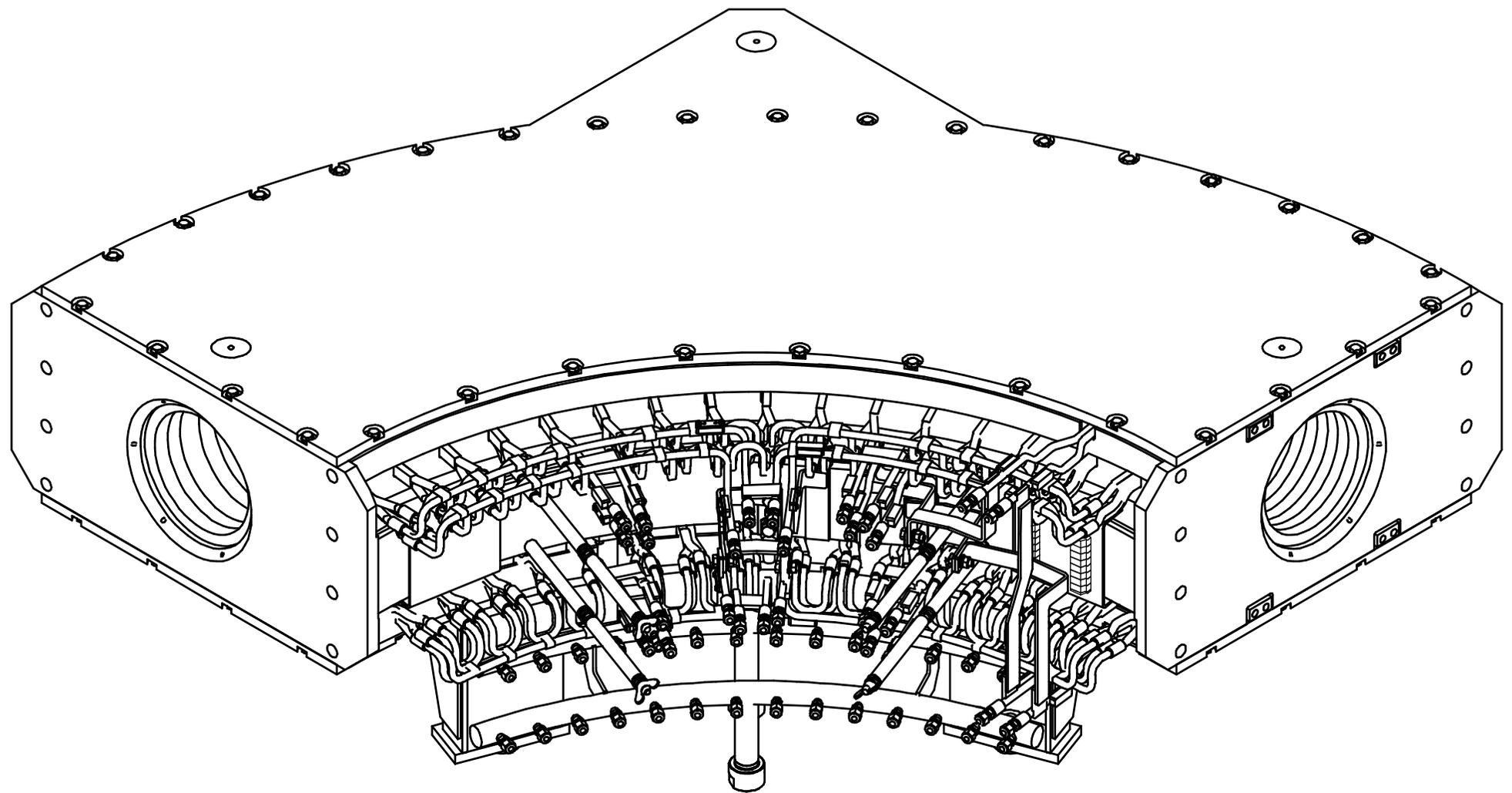


Рисунок 56 – Поворотный соленоид

Деформации корпуса с несущими фланцами на боковых стенках которого закреплены направляющие, полученные при численном моделировании приведены на рисунке 57.

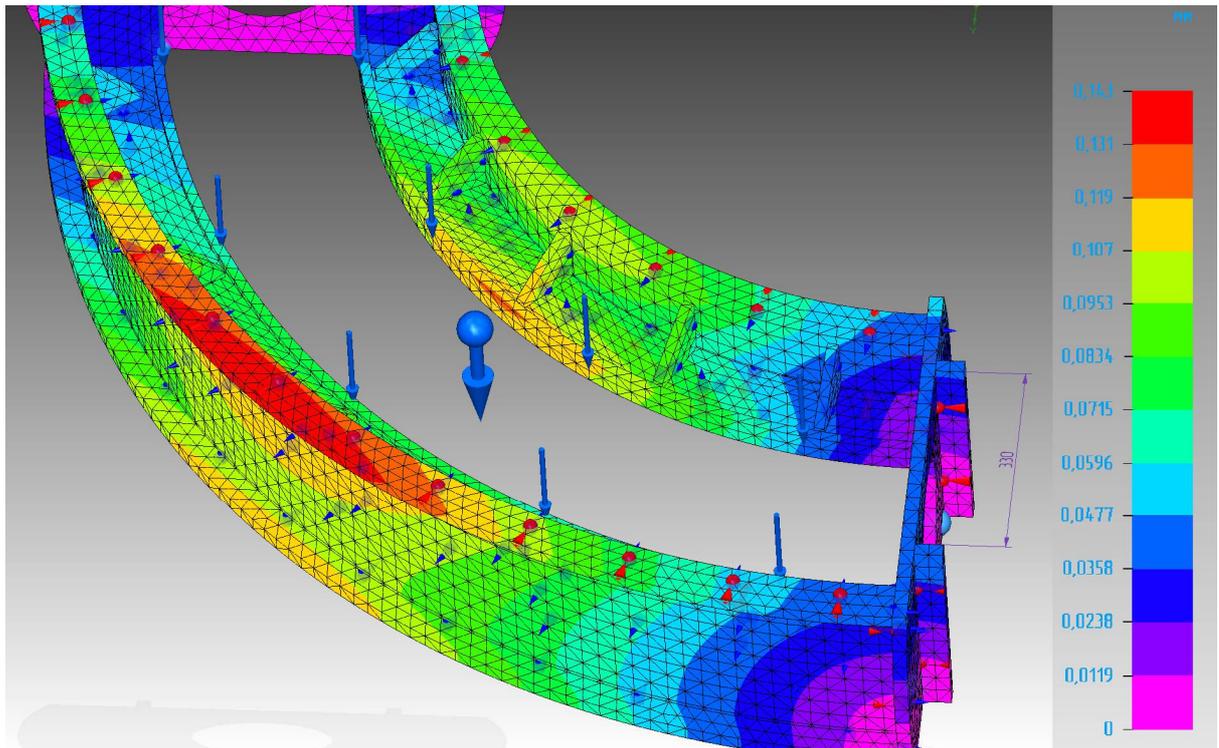


Рисунок 57 – Деформации корпуса поворотного соленоида

При последующей конструкторской проработке было найдено более удачное решение, в котором ребра жесткости корпуса (1, рисунок 58) были замкнуты в прямоугольное сечение. Внутри несущего корпуса (1) на направляющих из немагнитной стали (4) располагаются основные обмотки (2а), коммутирующая пайка которых (2б) осуществляется с внешней стороны корпуса (1) по внутренней части поворота. Для соединений используются заранее подготовленные (сформованные) отрезки обмоточной шинки (2а). После пайки и выполнения коммутирующих соединений выводы обмоток покрываются электроизоляционным лаком. По внутренней части корпуса поворота предусмотрены места для размещения клеммных колодок коммутации цепей коррекций и термоключей (5). На верхней и нижней крышках корпуса (1) устанавливаются обмотки поворотного поля (3), подробно описанные в части 2.2 главы 2 диссертации (рисунок 50).

Формирующие транспортное продольное поле основные обмотки поворотного соленоида выполнены в виде сборок, содержащих намотанные в противоположных направлениях (левая и правая) двухслойные «блины» (1а, 1б рисунок 59), собранные на клине (2) задающем угол в $1,4^\circ$. В корпус обмотки устанавливаются при помощи закладных (3а, 3б). Сборка пропитывается эпоксидным компаундом горячего отверждения. Всего соленоид содержит 32 сдвоенных (64 одиночных) обмотки ведущего поля. Техническая характеристика обмоток приведена в таблице 23.

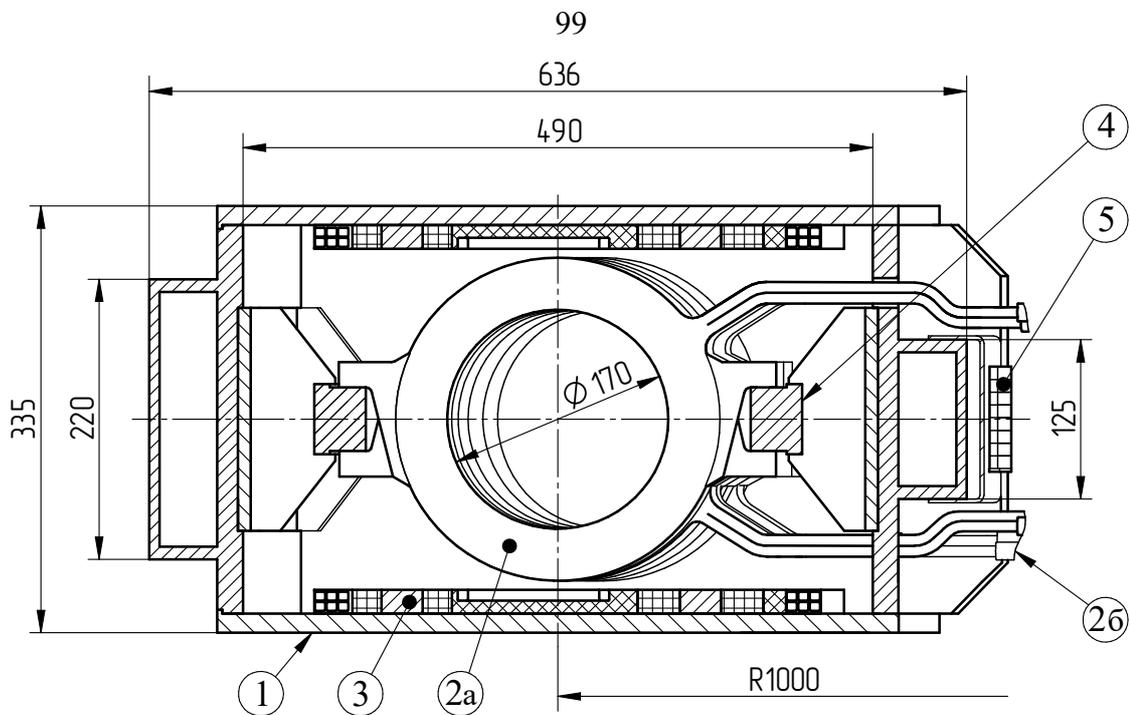


Рисунок 58 – Поперечный разрез поворотного соленоида

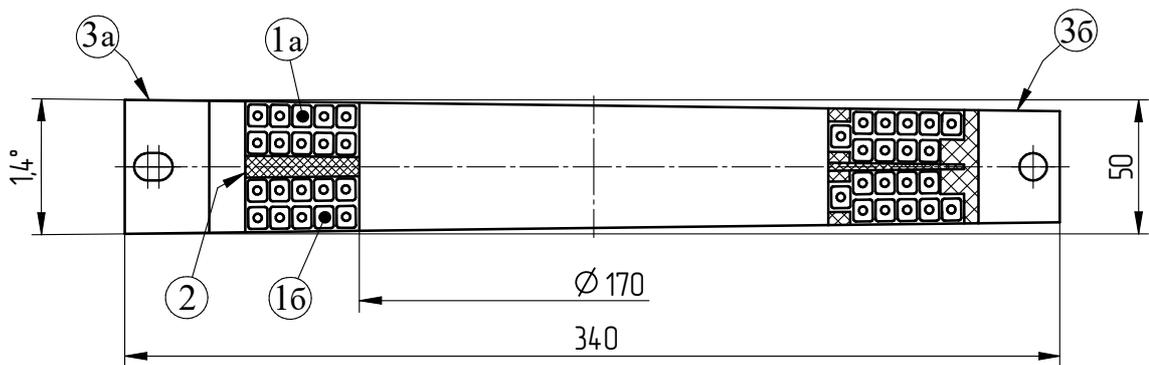


Рисунок 59 – Радиальный разрез основной обмотки поворотного соленоид

Таблица 23 – Техническая характеристика основных обмоток поворотного соленоида

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	КЛИН
Число обмоток в сборке	2
Размеры сечения каждой обмотки по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	40 x 19
Число витков (виток x слой), общее	20 (5 x 4)
Размеры сечения шинки, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3
Длина намотки шинки, общая, $L_{\text{ш}}$, м	15
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	340 x 50 x 252
Сопротивление, общее (20°C), мОм	5,38
Рассеиваемая мощность, Вт	212
Расход охладителя (вода, $\Delta T=10\text{K}$), л/мин	0,31
Падение давления охладителя, бар	0,61
Ток питания, А	195

Для оптимизации гидравлического режима работы основные обмотки соленоида объединяются в последовательные контуры охлаждения. Все обмотки, включая обмотки поворотного поля соленоида, поделены на 14 параллельных гидравлических контуров, которые организованы следующим образом:

- 1) 2 контура – водоохлаждаемые обмотки сборок поворотного поля;
- 2) 12 контуров – 64 одиночных обмотки ведущего (продольного) поля.

Гидравлические контуры обмоток ведущего поля образованы последовательным соединением обмоток: 8 групп, состоящих из 5 обмоток, и 4 группы, состоящих из 6 обмоток (5,33 среднее число обмоток в каждом контуре охлаждения). Их коммутация выполняется пайкой медной шинки (такого же сечения как у обмоток) через охватывающую медную втулку.

Соединение обмоток ведущего поля в группы позволяет обеспечить средний расход охладителя (воды, $\Delta T=12,5$ К) в гидравлическом контуре на уровне около 0,62 л/мин при перепаде давления 5,1 бар. При таком давлении с расходом охладителя на уровне 0,78 л/мин нагрев охлаждаемой обмотки сборки поворотного поля можно оценить на уровне 15 К. Общий расход охладителя, необходимый для обеспечения заданного теплового режима, при этом составит 9 л/мин.

Всего в установке применяется 6 поворотных соленоидов, 4 из которых могут устанавливаться как в горизонтальном, так и вертикальном положении. А оставшиеся 2 отличаются тем, что нижняя пластина их магнитопровода выполнена в большем габаритном размере и является крышкой прямолинейного транспортного соленоида (LINE18).

Техническая характеристика поворотного соленоида дана в таблице 24

Таблица 24 – Техническая характеристика поворотного соленоида

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	основные	поворотные
Тип обмоток		
Число обмоток, шт	32	2
Ток питания, А	195	295
Сопротивление (20°C), Ом	0,023	2,6
Рассеиваемая мощность, кВт	8,2	
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5$ К), л/мин	9	
Падение давления, бар	5,2	
Вес магнита, кг	903	
Габаритные размеры магнита, В x L x Н (корпус), мм	1350x1350x611 (335)	

Вся электрическая коммутация обмоток поворотного соленоида после установки изделия на месте эксплуатации закрывается защитными изоляционными кожухами (не показанными на рисунке 56). Выступ на внешнем радиусе крышек поворота выполнен по просьбе заказчика для большей наглядности положения при его установке – так подчеркивается вертикальность (горизонтальность) линий корпуса.

3.2 Прямолинейные соленоиды

Прямолинейные соленоиды (LINE2, LINE2-5 и LINE18, рисунок 54) конструктивно опираются на одно поперечное сечение, которое для соленоида LINE2, имеющего два канала, дублируется – один соленоид ставится на другой (рисунок 60, фотографии изделий приведены на рисунках Б.3, Б.5).

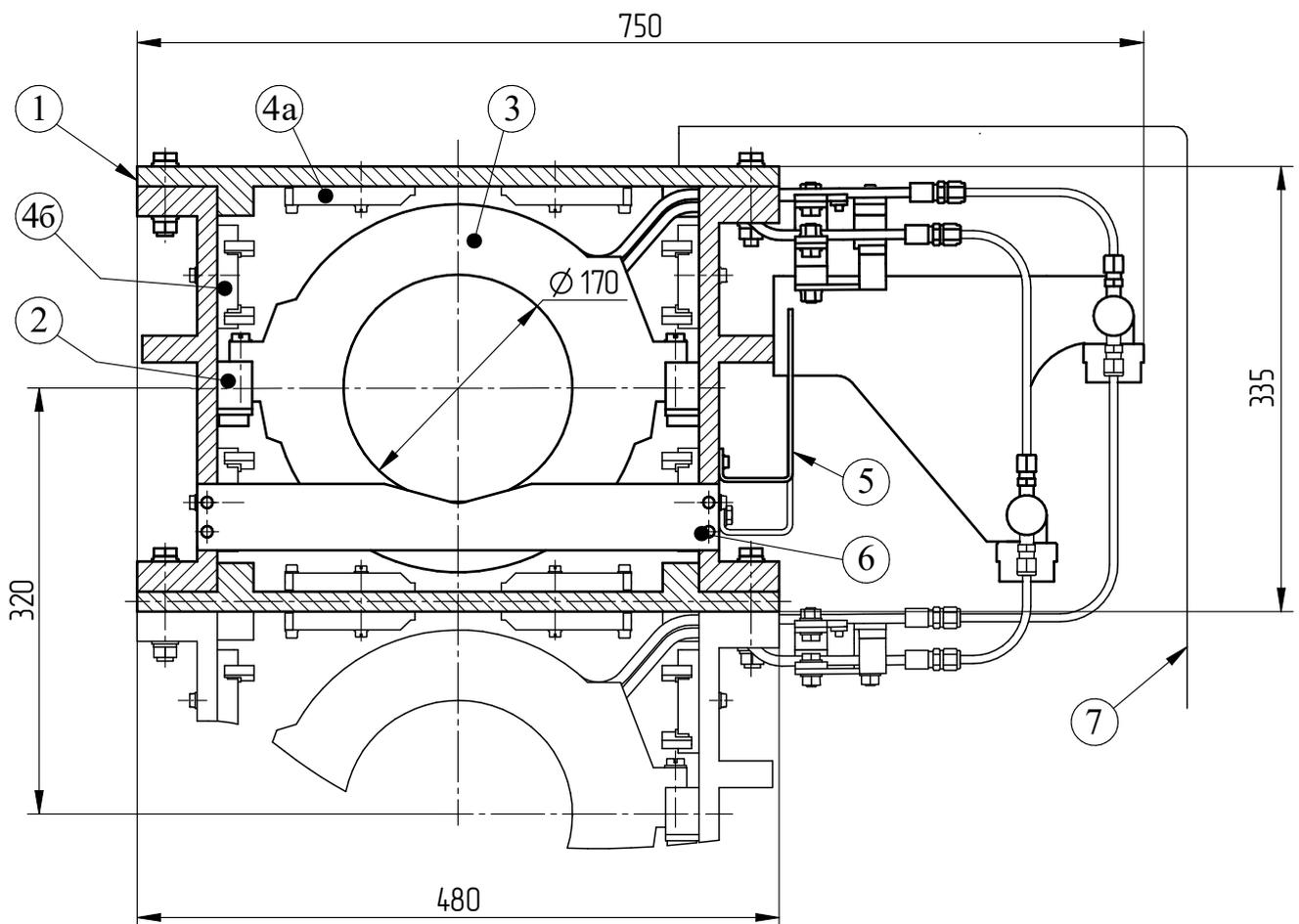


Рисунок 60 – Поперечное сечение прямолинейного соленоида транспортного канала

Типовой корпус прямолинейного соленоида (1, рисунок 60) состоит из 4-х частей, которые собираются при помощи болтовых соединений и формируют закрытый короб¹ без торцевых стенок (что при последовательном соединении корпусов соленоидов позволяет сформировать непрерывный канал из чередующихся обмоток, расставленных с равномерным шагом, без каких-либо перегородок (разделителей)). К боковым стенкам корпуса крепятся направляющие (2), с выполненными в них отверстиями, задающими шаг расстановки обмоток основного поля (3). Со стороны вставок (INSERT, рисунок 54) на направляющих (2) устанавливаются шарниры, к которым крепятся направляющие вставок². Для исполнения LINE2 (и LINE2-5) к крышке и днищу корпуса (1, рисунок 60) крепятся обмотки вертикального поля (4а), а к стенкам – обмотки горизонтального поля (4б), составляющие корректор положения электронного пучка. Со стороны коллектора системы охлаждения на боковой стенке корпуса (1) предусмотрены площадки (5) для размещения силовых и коммутационных контактных колодок. На торце корпуса (1) устанавливаются пластины, поддерживающие вакуумную камеру транспортного канала (6). Все электрические и гидравлические соединения соленоидов закрываются защитными кожухами (7).

В прямолинейных соленоидах данной группы есть и другие отличия. Отличается торец соленоида LINE2-5 (конструкция с одним каналом), сопрягаемый с соленоидом LINE08 (рисунок 54), который закрывается металлическим фланцем такой же формы как фланец поворота (BEND, рисунок 59). Верхняя крышка исполнения LINE18 разрезана на всю длину нижней пластины поворотов (BEND-2 (up) и BEND-3(up), рисунок 54); на вырезанном участке крышки установлены 2 поперечные пластины, усиливающие жесткость корпуса.

Обмотки продольного поля соленоидов выполнены парами, намотанными в противоположных направлениях (левая и правая), их техническая характеристика дана в таблице 25. Их намотка производится проводником прямоугольного сечения с каналом для охлаждающей жидкости. На направляющие (2, рисунок 60) обмотки устанавливаются при помощи закладных элементов крепления, расположенных в сборке обмотки. Сборка пропитывается эпоксидным компаундом горячего отверждения.

Обмотки коррекции³, формирующие горизонтальное поле (4б, рисунок 60) соленоида LINE2, представляют из себя сплошную обмотку, выполненную проводом прямоугольного сечения на немагнитном сердечнике (материал сердечника Д16Т). Характеристики обмотки приведены в таблице 26.

¹ Корпус соленоида LINE2 образован повторением используемых частей корпуса верхнего канала в нижнем и состоит из 7-ми составных частей.

² Конструкция направляющих описана в разделе 3.5 главы 3 диссертации.

³ Схема расположения корректоров приведена в разделе 5.2 главы 5 диссертации.

Таблица 25 – Техническая характеристика основной обмотки прямолинейного соленоида

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	86 x 46
Число витков (виток x слой)	60 (10 x 6)
Размеры сечения шинки, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3
Длина намотки шинки, $L_{\text{ш}}$, м	48,0
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	342 x 90 x 270
Сопротивление (20°C), мОм	17,2
Рассеиваемая мощность, Вт	314
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5\text{K}$), л/мин	0,36
Падение давления охладителя, бар	2,8
Ток питания, А	132
Номер позиции (рисунок 60)	3

Таблица 26 – Техническая характеристика корректирующей обмотки горизонтального поля прямолинейного соленоида LINE2

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	26 x 15,5
Число витков (виток x слой)	110 (22 x 5) ¹
Марки проводника	ПСДТ
Сечение проводника, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	424,5
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	80x1895x28,5
Сопротивление (20°C), Ом	3,032
Рассеиваемая мощность, Вт	109,2
Ток питания, А	6
Номер позиции (рисунок 60)	46

¹ Первый (торцевой) слой, содержащий 22 витка, наматывается сам на себя, а намотка остальных витков производится чередованием слоев «челноком» в 4 слоя (т.е. укладывается один виток в первом слое, затем – во втором, третьем и четвертом, после чего укладывается второй виток в четвертом, третьем, втором и первом слоях и так далее до полного заполнения сечения).

Обмотки коррекции, формирующие вертикальное поле (4а, рисунок 60), состоят из двух обмоток, выполненных проводом прямоугольного сечения на немагнитных сердечниках. Характеристики обмоток соленоида LINE2 приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Техническая характеристика корректирующей обмотки горизонтального поля прямолинейного соленоида LINE2

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	Обмотка 1	Обмотка 2
Форма сечения обмотки	прямоугольная	
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	19 x 6,2	28 x 6,2
Число витков (виток x слой)	32 (16 x 2)	46 (23 x 2)
Марки проводника	ПСДТ	
Сечение проводника, $I_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)	
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	119,6	170,4
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	60 x 1895 x 6,2	75 x 1895 x 6,2
Сопротивление (20°C), Ом	0,855	1,217
Рассеиваемая мощность, Вт	30,8	43,8
Ток питания, А	6	6
Номер позиции (рисунок 60)	4а	

Аналогичные корректирующие обмотки соленоида LINE2-5 имеют такую же конструкцию, как и обмотки коррекции соленоида LINE2, но при этом они длиннее на 95 мм, что оказывает влияние на их характеристики (таблицы 28 и 29).

После намотки и сборки между собой обмотки коррекции помещаются в тонкий корпус из стеклотекстолита и пропитываются эпоксидным компаундом горячего отверждения.

При выполнении окончательной сборки прямолинейных соленоидов были обнаружены места с затрудненным доступом, которые удалось улучшить небольшой модернизацией изделий, которую можно пояснить при помощи рисунка 61.

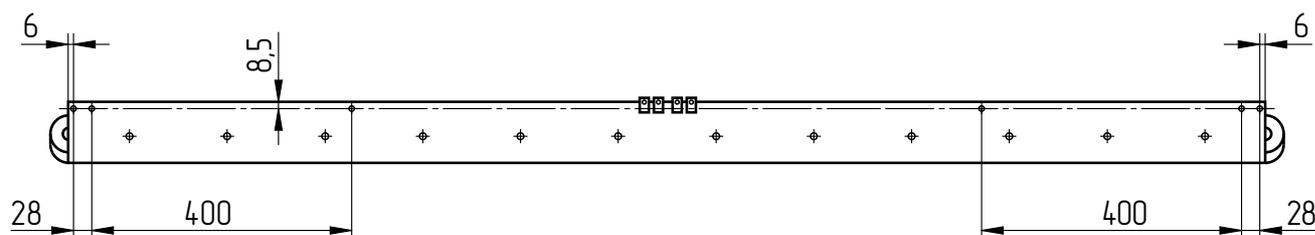


Рисунок 61 – Расположение дополнительных крепежных отверстий на корректоре вертикального поля соленоидов LINE2 и LINE2-5

Таблица 28 – Техническая характеристика корректирующей обмотки
горизонтального поля прямолинейного соленоида LINE2-5

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	26 x 15,5
Число витков (виток x слой)	110 (22 x 5) ¹
Марки проводника	ПСДТ
Сечение проводника, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	445,8
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	80 x 1990 x 28,5
Сопротивление (20°C), Ом	3,184
Рассеиваемая мощность, Вт	114,6
Ток питания, А	6

Таблица 29 – Техническая характеристика корректирующей обмотки
горизонтального поля прямолинейного соленоида LINE2-5

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
	Обмотка 1	Обмотка 2
Форма сечения обмотки	прямоугольная	
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	19 x 6,2	28 x 6,2
Число витков (виток x слой)	32 (16 x 2)	46 (23 x 2)
Марки проводника	ПСДТ	
Сечение проводника, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)	
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	125,6	178,9
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	60 x 1990 x 6,2	75 x 1990 x 6,2
Сопротивление (20°C), Ом	0,897	1,278
Рассеиваемая мощность, Вт	32,3	46,0
Ток питания, А	6	6
Номер позиции (рисунок 60)	4а	

¹ При перепаде давления 5,7 бар, обеспечивающим номинальный тепловой режим обмотки поворотного поля, расчетный расход охладителя составляет 55,4 л/мин на канал, 110 л/мин – общий.

Суть модернизации заключается в модификации не совсем удачного расположения группы коммутационных соединений в средней части корректоров вертикального поля (рисунок 61). Так, для облегчения сборки токовых соединений цепей питания обмоток коррекции¹ первоначальное месторасположение соединений, выполненное в средней части сборок обмоток коррекции, было дополнено промежуточными быстроразъемными клеммными колодками (типа WAGO 323) [53]. Для их установки на краях корпусов обмоток были выполнены отверстия с межцентровым расстоянием 28 мм (рисунок 61), что позволяет выполнить коммутацию корректоров на торцах прямолинейного соленоида, не прибегая даже к частичной разборке его корпуса.

Помимо описанных ранее отличий исполнений LINE2, LINE2-5 и LINE18, прямолинейные транспортные соленоиды данной группы отличаются между собой числом обмоток ведущего поля в канале соленоида. Так, в одном канале LINE2 содержится 20 обмоток, а в соленоидах LINE18 и LINE2-5 – 19 и 21 обмотка, соответственно. Число размещенных в соленоиде обмоток напрямую определяет габаритную длину его корпуса. Технические характеристики соленоидов приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Техническая характеристика прямолинейных соленоидов

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ		
	LINE18	LINE2	LINE2-5
Тип соленоида	LINE18	LINE2	LINE2-5
Число каналов соленоида	1	2	1
Число основных обмоток на канал (общее), шт	19	20 (40)	21
Число корректоров на канал (общее), шт	-	8 (16)	8
Сопrotивление основных обмоток на канал, (20°C) Ом	0,33	0,34 (0,69)	0,36
Рассеиваемая мощность канала (общая), кВт	5,7	5,9 (11,8)	6,3
Расход охладителя на канал (общий), вода, л/мин	6,9	7,3 (14,5)	7,6
Падение давления охладителя, бар		2,8	
Ток основных обмоток, А		132	
Вес, кг	863	2086	1368
Габаритные размеры профиля, В x Н, мм	835x365	786x685	900x368
Габаритная длина, L, мм	1805	1900	2015

¹ Целесообразно, когда данная операция выполняется на собранном изделии и не требует его частичной разборки.

3.3 Соленоид с отсекающим шибером

По конструктивной последовательности сборки, с которой можно ознакомиться в приложении А, после поворотных соленоидов BEND, установленных под высоковольтным объемом (баком), монтируются прямолинейные соленоиды LINE08 (рисунок 54), в вакуумной части которых устанавливаются шиберы (5б, рисунок 62), отсекающие участок высоковольтного объема от всей вакуумной системы установки, и откачное оборудование (5а) этого участка. Последовательность сборки и наличие дополнительного вакуумного оборудования определяют конструкцию соленоида LINE08. Фотографии готовых изделий приведены на рисунках Б.7, Б.11, Б.12.

Если рассматривать изделия концептуально, то соленоид, ограниченный в сечении пластинами (1г, рисунок 62), повторяет конструкцию прототипа (вставки транспортного канала line05 СЭО COSY [64]), и в нем используются обмотки ведущего поля с такой же технической характеристикой (таблица 31), однако, новая конструкция вставок имеет существенные доработки и другие продольные размеры.

Таблица 31 – Техническая характеристика обмоток продольного поля соленоида LINE08

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	33 x 65
Число обмоток в сборке, шт.	2
Число витков в обмотке (виток x слой); (общее)	18 (9x2); (36)
Размеры сечения шинки, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3
Длина намотки шинки, $L_{\text{ш}}$ (общая), м,	27,5 (45,0)
Габаритные размеры сборки, В x L x Н, мм	34 x 597 x 577
Сопротивление сборки (20°C), мОм	8,1
Рассеиваемая мощность сборки, Вт	512
Число гидравлических контуров охлаждения сборки, шт	2
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5\text{K}$) в контуре (общий), л/мин	0,59 (1,2)
Падение давления охладителя, бар	2,8
Ток питания, А	246
Номер позиции (рисунок 62)	2

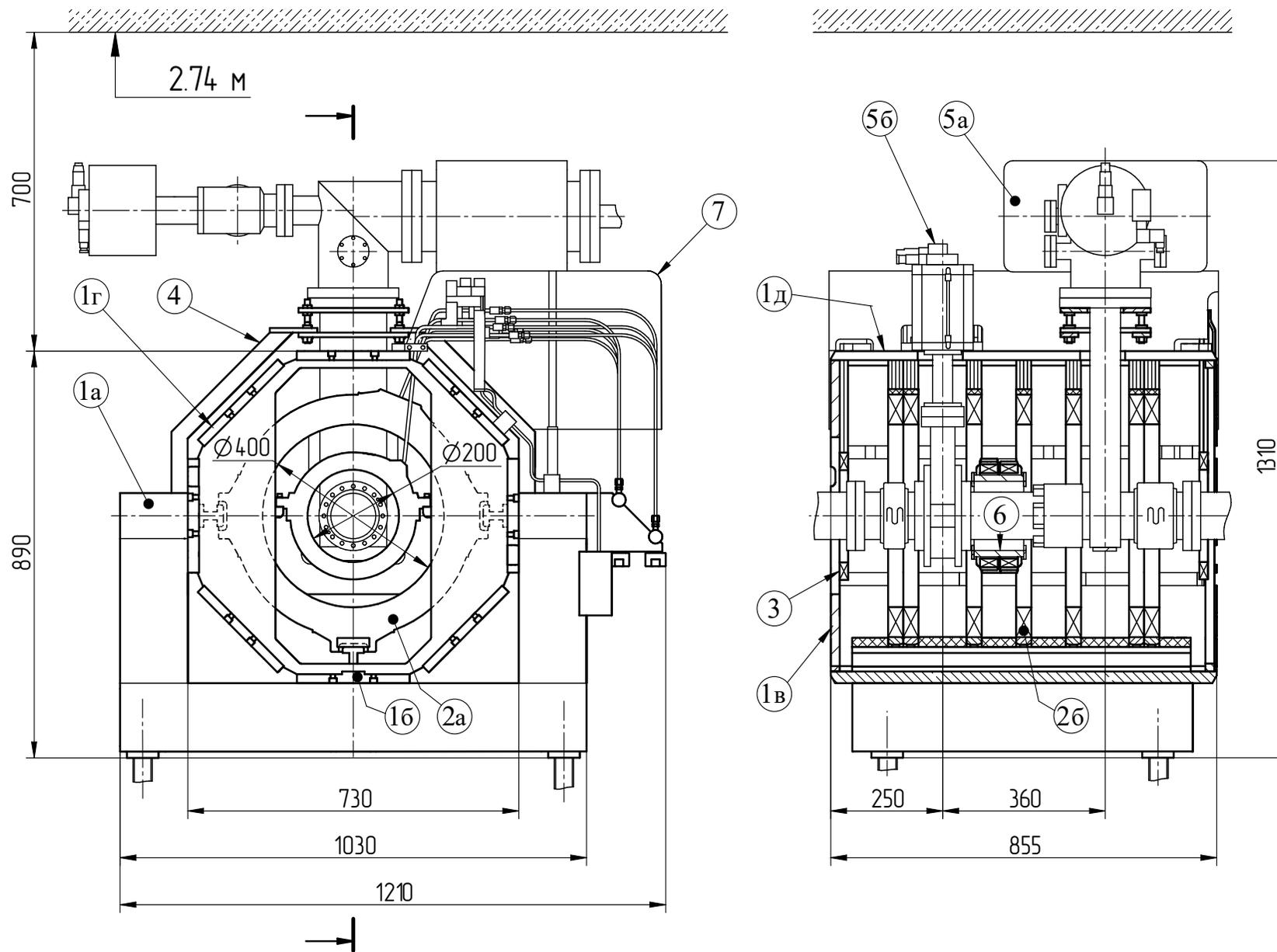


Рисунок 62 – Устройство соленоида LINE08

Рама (1а, рисунок 62) вставки выполнена таким образом, что ее неотъемлемой частью являются три пластины корпуса (1б) с направляющими, предназначенными для установки (и перемещения по ним) основных обмоток (2) соленоида. Наличие зафиксированных на раме направляющих позволяет при сборке вакуумной камеры и монтаже дипольного корректора ларморовского вращения (6) демонтировать все незакрепленные на раме пластины, крышку и фланцы (1г, 1д, 1в) корпуса вставки, не вывешивая при этом обмотки (2) на вакуумной камере. Наличие интегрированной новую конструкцию корпуса соленоида рамы позволяет обеспечить возможности максимальной разборки корпуса и перемещения обмоток по направляющим, необходимые для организации доступа к вакуумным соединениям при проведении монтажа СЭО на комплексе NICA.

Так же для доступа к вакуумным соединениям во вставке применяются обмотки с увеличенной до 400 мм апертурой (окном обмоток). В отличие от обмоток вставки транспортного канала line05 СЭО COSY [64], в новых обмотках (2, рисунок 62) для улучшения их скольжения по направляющим применяются закрепленные в закладных элементах обмоток бронзовые вставки. Шаг расстановки обмоток обеспечивается проставками из стеклотекстолита, устанавливаемыми на направляющих. Соленоиды дополнены обмотки с апертурой 200 мм (3), которые с одной стороны соленоида крепятся к его фланцу (1в), а с другой – к фланцу следующего за ним элемента (LINE2-5 либо BEND согласно схемы расположения элементов магнитной системы, рисунок 54), в котором предусмотрены резьбовые отверстия для крепления опор обмоток.

Обмотки соленоида (2, 3 рисунок 62) изготавливаются из проводника прямоугольного сечения с каналом для охлаждающей жидкости и после намотки (в сборе с закладными) пропитываются эпоксидным компаундом горячего отверждения. После пропитки поверхности бронзовых вкладышей закладных элементов, сопрягаемые с направляющими вставок, механически обрабатываются. Обмотка (2) выполнена из двух «блинов», намотанных в противоположных направлениях, вместе формирующих одну составную обмотку.

Обмотки (3, рисунок 62) выполнены на основе 10 витковой обмотки, используемой во вставках транспортного канала INSERT¹, но отличаются удлиненными выводами, необходимыми для расположения коммутации обмотки за пределами корпуса соленоида LINE08. По сравнению с обмотками вставки INSERT, изменена только длина выводов и сохранены все конструктивные элементы обмотки (закладные, вкладыши, флажки и т.д.). Суммарно длина выводов увеличена менее чем на 500 мм, что можно считать незначительно влияющим на технические характеристики исходной обмотки фактором.

¹ Описание приводится в разделе 3.5 главы 3 диссертации.

После сборки внутренней части соленоида на корпус устанавливается опора (4, рисунок 62), поддерживающая массивное откачное оборудование (5а). Откачной порт и управляющая часть шибер (5б) выводятся через разрезную крышку (1д). Шибер (5б), откачное оборудование (5а) в сборе со всей вакуумной камерой вставки могут быть установлены развернутыми на 180° (рисунок 63).

Силовая электрическая коммутация закрывается изоляционным кожухом (7, рисунок 62), под которым располагается коллектор системы охлаждения обмоток. Положение элементов, изображенных на рисунке 63, соответствует положению верхнего канала установки, при котором формируется зазор в 700 мм между крышкой (1д) и потолком (плитами радиационной защиты помещения), находящимся на отметке 2,74 м¹.

Техническая характеристика соленоида LINE08 приведена в таблице 32.

Таблица 32 – Техническая характеристика соленоида LINE08

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Число основных обмоток, шт	9
Сопrotивление основных обмоток ² , (20°С) МОм	60,3
Рассеиваемая мощность ² , кВт	4,0
Расход охладителя (воды) ² , л/мин	10,2
Падение давления охладителя, бар	2,8
Ток основных обмоток, А	246
Вес, кг	740
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	1210x855x890

Важно уточнить, что промежутки, в которые устанавливаются соленоиды LINE08, формируемые после размещения всех элементов магнитной системы, отличаются на величину в 5 мм (зазор BEND-BEND и зазор BEND-LINE, рисунок 63), такое изменение длины было предусмотрено в конструкции корпусов соленоидов. Длина соленоида может быть изменена за

¹ Данный уровень был перенесен с начальной отметки в 2,54 м не позволявшей разместить часть оборудования, что было обнаружено при проектировании СЭО и далее, изменение высоты помещения, было согласованно с проектной организацией (ЗАО “КОМЕТА”, г. Москва) [18].

² С учетом 10 витковой обмотки (3, рисунок 62).

счет подвижки его фланцев (1в, рисунок 62) на величину до 15 мм по пазам в пластинах (1б, 1г, 1д). Увеличенный диапазон перемещений заложен для возможности компенсации фактических отклонений величины промежутка, который будет образован при окончательном монтаже готовых элементов установки, т.к. готовые элементы имеют различные отклонения от номинальных значений размеров конструкторской документации. Это решение позволит замкнуть корпуса всех соленоидов СЭО в единую протяженную конструкцию.

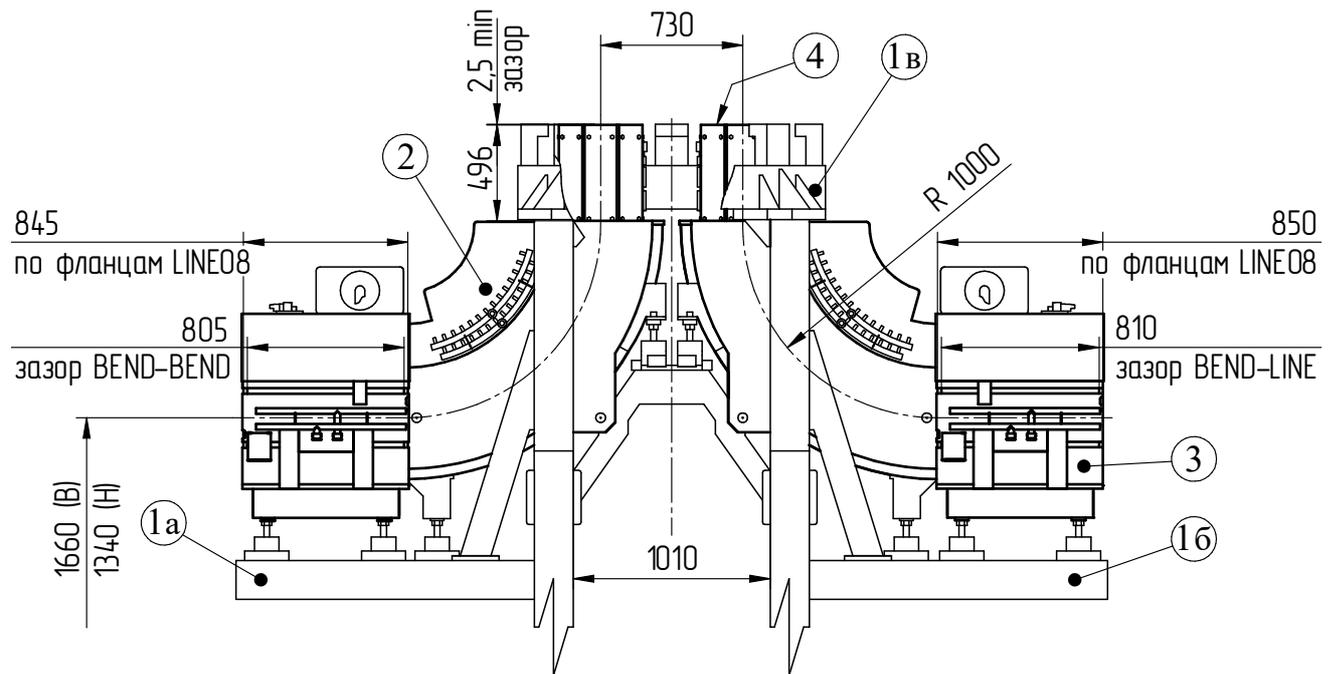


Рисунок 63 – Промежуток LINE08 – НМАТЧН – НМАТЧН – LINE08

На рисунке 63 обозначено расстояние до равновесной, соответствующее положениям элементов верхнего (В) и нижнего (Н) каналов установки, находящихся на одной опорной конструкции вместе с высоковольтной частью. Фланец высоковольтного бака будет опираться на кольцевую опору (1в), замыкающую две развитые опорные стойки (1а и 1б), формируя проем в 1010 мм между ними. На опорах устанавливаются поворотные соленоиды BEND (2), на верхних фланцах которых размещаются согласующие вставки НМАТЧН (4). Соленоиды (2, 3) устанавливаются так, чтобы коллекторы системы охлаждения и силовые разъемы электрического питания находились с одной из сторон СЭО¹. Вакуумная система соленоидов (3) при этом собирается зеркальной относительно вертикальной плоскости симметрии промежутка (рисунок 63).

¹ Определяется в зависимости от того, к какому из каналов СЭО эти элементы относятся. Для верхнего канала – это внешняя сторона, для нижнего канала – внутренняя стороны установки.

3.4 Согласующая секция 0,5-1 кГц

Первым¹ (и завершающим) по ходу движения электронного пучка магнитным элементом СЭО является согласующая секция (НМАТЧН, рисунки 54 и 64, фотография приведена на рисунке Б.7). Данные секции позволяют сформировать согласованное изменение транспортного магнитного поля на выходе из электронной пушки со значения в 0,5 кГц до величины в 1 кГц, используемого в соленоидах транспортной системы электронного пучка, и в обратном направлении – на входе в коллектор. В качестве цифрового прототипа для данного элемента были использованы конструкторские модели аналогичной согласующей вставки, которую ранее изготавливали в ИЯФ СО РАН для СЭО COSY [65]. При этом в новой конструкции используется ряд как конструктивных улучшений, так и изменения, вызванные необходимостью получения новых физических параметров. Так, для использования секции в составе системы электронного охлаждения коллайдера NICA в нее добавлена 10 витковая обмотка (2, рисунок 64), используемая во вставках транспортного канала INSERT². Ведущее поле согласующей секции формируется обмотками³, изображенными на рисунке 65. Техническая характеристика обмотки приведена в таблице 33.

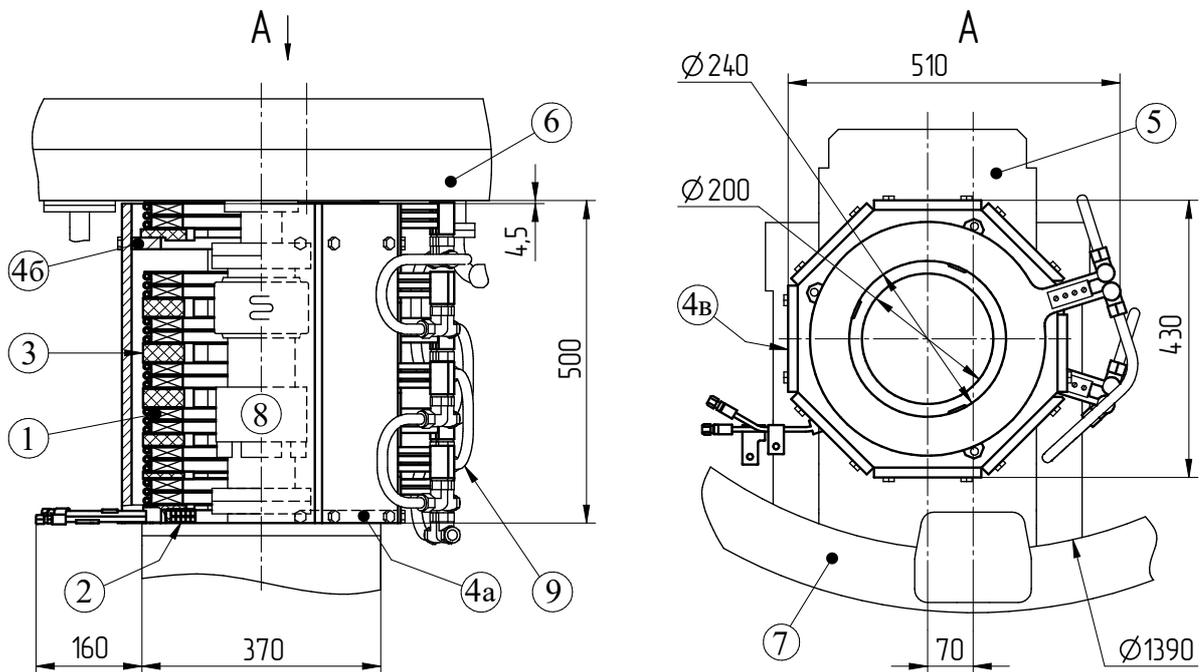


Рисунок 64 – Устройство согласующей секции НМАТЧН 0,5-1 кГц

¹ Расположенным за пределами высоковольтного объема.

² Описание приводится в разделе 3.5 главы 3 диссертации.

³ Обмотки, формирующие ведущее поле согласующих секций СЭО коллайдера NICA, аналогичны обмоткам, примененным в согласующих секциях СЭО COSY, однако конструкторская документация была полностью переработана с учетом современных технологических возможностей.

Таблица 33 – Техническая характеристика обмотки продольного поля
согласующей секции НМАТЧН

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения обмотки по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	48,5 x 17,5
Число витков (виток x слой)	470 (10 x 47)
Марка проводника	ПЭВ-2
Диаметр проводника, $d_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,28 (1,18)
Число обмоток	2
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, (одной обмотки) м	788,1 (394)
Габаритные размеры сборки, В x L x Н, мм	42 x 363 x 485
Сопротивление (20°C), Ом	12,4
Рассеиваемая мощность, Вт	449,0
Число гидравлических контуров охлаждения сборки, шт	3
Расход охладителя (вода, $\Delta T=1,8\text{K}$), л/мин	3,6
Падение давления охладителя, бар	0,02
Ток питания, А	6

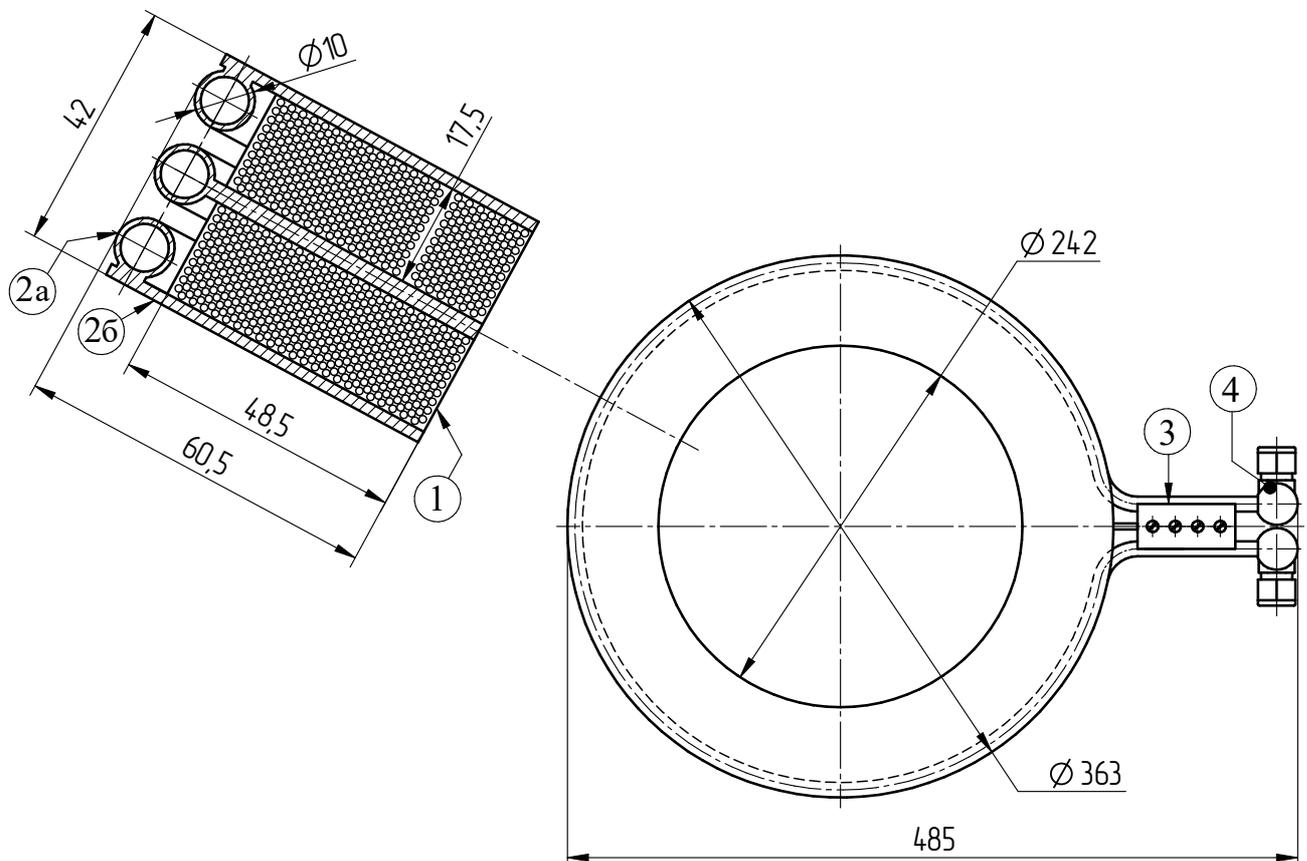


Рисунок 65 – Основная обмотка согласующей секции НМАТЧН

Изображенная на рисунке 64 секция собирается в зазоре равном 500 мм между торцевым фланцем поворотного соленоида BEND (5) и фланцем высоковольтного объема (6). Данное место снаружи ограничено опорным кольцом¹ (7) высоковольтного объема.

Внутри согласующей секции располагается вакуумная камера (8, рисунок 64), содержащая датчик положения электронного пучка и компенсационный сильфонный узел, присоединяемый к вакуумной камере, находящейся внутри высоковольтного объема пушки (так же камере коллектора). Доступ к фланцу вакуумной камеры секции со стороны сильфона, обеспечивается тем, что конструкцией корпуса предусмотрена возможность снятия (полностью или частично) его боковых пластин (4в). При частичной разборке несущая способность обеспечивается минимум двумя боковыми пластинами (4в), диаметрально закрепленными к фланцам корпуса (4а) и (4б), при этом верхняя обмотка (1), расположенная на фланце (4б), не мешает доступу к соединяемым фланцам вакуумной системы. Обмотки (1), расположенные ниже фланца секции (4б), для обеспечения доступа к вакуумной камере могут быть максимально компактно уложены на фланец (4а) за счет извлечения проставок (3), задающих шаг их расстановки. Так как в конструкции обмоток контур системы охлаждения развязан с электрическим контуром – гидравлическая коммутация выполняется предварительно сформованными трубками из нержавеющей стали (9).

При полной разборке корпусов согласующих секций могут быть сняты все боковые пластины (4в, рисунок 64), а фланец (4б) будет оставаться между обмоток (не извлекаемым), что обеспечит максимальный доступ к фланцу (6) высоковольтного объема.

Боковые пластины (4в, рисунок 64) секции относительно длины монтажного промежутка изготовлены с зазором, необходимым для простоты их установки. Величина зазора выставляется при сборке магнитной системы от минимального своего значения в 2,5 мм (рисунок 63) до максимального в 4,5 мм.

Секции, геометрически сопрягаемые с осью пушки (коллектора), смещены относительно оси фланца высоковольтного объема на 70 мм (приложение В). Техническая характеристика секции дана в таблице 34.

Основные обмотки секции (рисунок 65) выполнены из двух «блинов» (1) в 400 витков, намотанных сплошным проводником круглого сечения. Гидравлическое охлаждение обеспечивается за счет трех контуров, выполненных медной трубкой (2а), припаянной к плоским кольцам (ножам) (2б). Подвод охлаждающей жидкости производится через распаянные на трубках распределительные коллекторы (4). Подвод питания к обмотке осуществляется через контактную колодку (3). Собранный составная обмотка пропитывается эпоксидным компаундом горячего отверждения.

¹ Общий вид места расположения можно рассмотреть по рисунку 63, где 1в - опорное кольцо, 4 - согласующая секция, 2 - поворотный соленоид.

Таблица 34 – Техническая характеристика согласующей секции НМАТСН

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Число основных обмоток ¹ , шт	8
Сопротивление основных обмоток ² , (20°С) Ом	86,8
Рассеиваемая мощность ² , кВт	3,2
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5K$) ² , л/мин	3,7
Падение давления охладителя, бар	0,8
Ток основных обмоток, А	6
Вес, кг	220
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	680x500x430

3.5 Вставки транспортного канала

Замыкающими звеньями при сборке транспортной системы установки являются вставки транспортного канала INSERT (рисунок 54) ³. При этом в конструкции решаются сразу две задачи обеспечения заключительной сборки. Во-первых, в виду того, что магнитная система составляется из отдельных элементов, каждый из которых отличается от номинального как минимум на величину предельных отклонений корпуса, то появляется необходимость компенсировать неточности изготовления элементов магнитной системы за счет зазоров, предусмотренных в конструкции вставок INSERT. Для замыкания корпуса установки эти зазоры перекрываются специальными накладными пластинами. Во-вторых, так как речь идет о непрерывном соленоиде магнитной системы, то в месте расположения замыкающих звеньев необходимо обеспечить возможность заключительного соединения фланцев вакуумных камер. В отличие от двухполюсных (или многополюсных) магнитов, которые часто собираются после установки вакуумной камеры, «неразъемные» обмотки соленоида необходимо надеть на вакуумную камеру, проходящую внутри этих обмоток.

Для решения второй задачи конструкция вставок организована таким образом, что в имеющемся зазоре, образованном после окончательной выставки соседних со вставкой элементов, расположение которых соответствует схеме магнитной системы (рисунок 54),

¹ С учетом 10 витковой обмотки (2, рисунок 64): 7 обмоток (1) и 1 обмотка (2).

² Без учета 10 витковой обмотки (2, рисунок 64).

³ Фотографии одиночных вставок в сборе с поворотными соленоидами приведены на рисунках Б.8 и Б.9.

устанавливаются направляющие (1, рисунок 66). При этом один конец направляющей (1) посредством 2-х осевого шарнира (2), допускающего вращение относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей, крепится к направляющим (3) прямолинейного соленоида¹, а второй конец устанавливается в специальную колодку (4), закрепленную на поворотный соленоид².

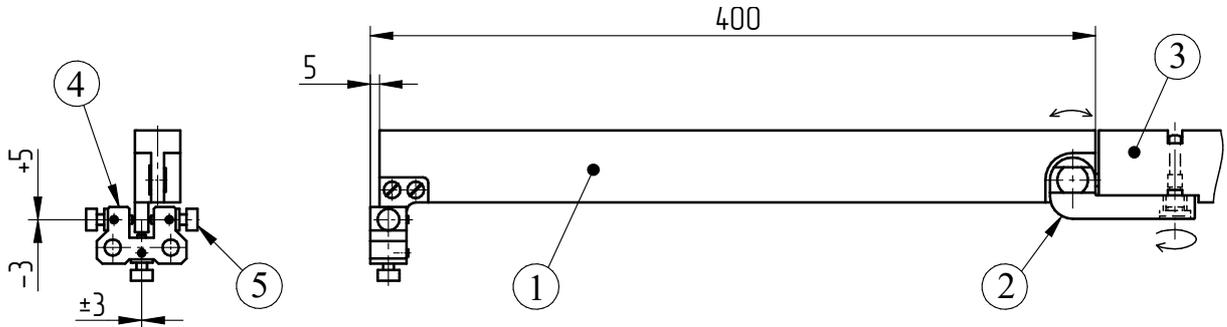


Рисунок 66 – Направляющая крепления обмоток вставки транспортного канала

В колодке (4, рисунок 66) расположены микрометрические винты (5), необходимые для точной выставки направляющих. Выставка направляющих проводится с целью уменьшения влияния от внецентричной расстановки обмоток на прямолинейных участках транспортного канала и может быть произведена при помощи лазерного трекинга.

После выставки направляющих в данном промежутке устанавливается замыкающий сифонный узел вакуумной камеры. Он устанавливается в «поджатом» состоянии с выполнением только одного фланцевого соединения, чтобы сформировать зазор достаточный для прохождения единичной обмотки соленоида. В образовавшийся зазор вакуумной системы по одной заводятся обмотки (6, рисунок 67). Обмотки размещаются на направляющих без фиксации. Фиксация обмоток (6) по отверстиям, выполненным в соответствии с шагом их расстановки на направляющих, производится после сборки второго фланцевого соединения сифонного узла. Техническая характеристика обмоток приведена в таблице 35.

Преимущество применения направляющих в конструкции вставок заключается в том, что обмотки не создают механических нагрузок на вакуумную камеру и могут быть сдвинуты в любое удобное для проведения монтажных работ положение.

Чтобы исключить механическое воздействие деталей корпуса вставок на уже выставленные обмотки, между направляющими и корпусом заложен конструктивный зазор (3 мм), а сам корпус может быть собран (или разобран) независимо от остальных частей вставки. Корпус вставки (7а, рисунок 67) консольно крепится к фланцам поворотных соленоидов уголками (8), при этом со стороны прямолинейного участка (между корпусом вставки и

¹ LINE2, LINE2-5 или LINE18.

² TOR90, BEND.

прямолинейных соленоидов) остается зазор, в который выводятся проводники электрических цепей (прогрева и сигнальных), коммутируемые на колодках снаружи корпуса. Зазор закрывается накладными пластинами (76). Электрическая и гидравлическая коммутация закрывается защитным кожухом (8).

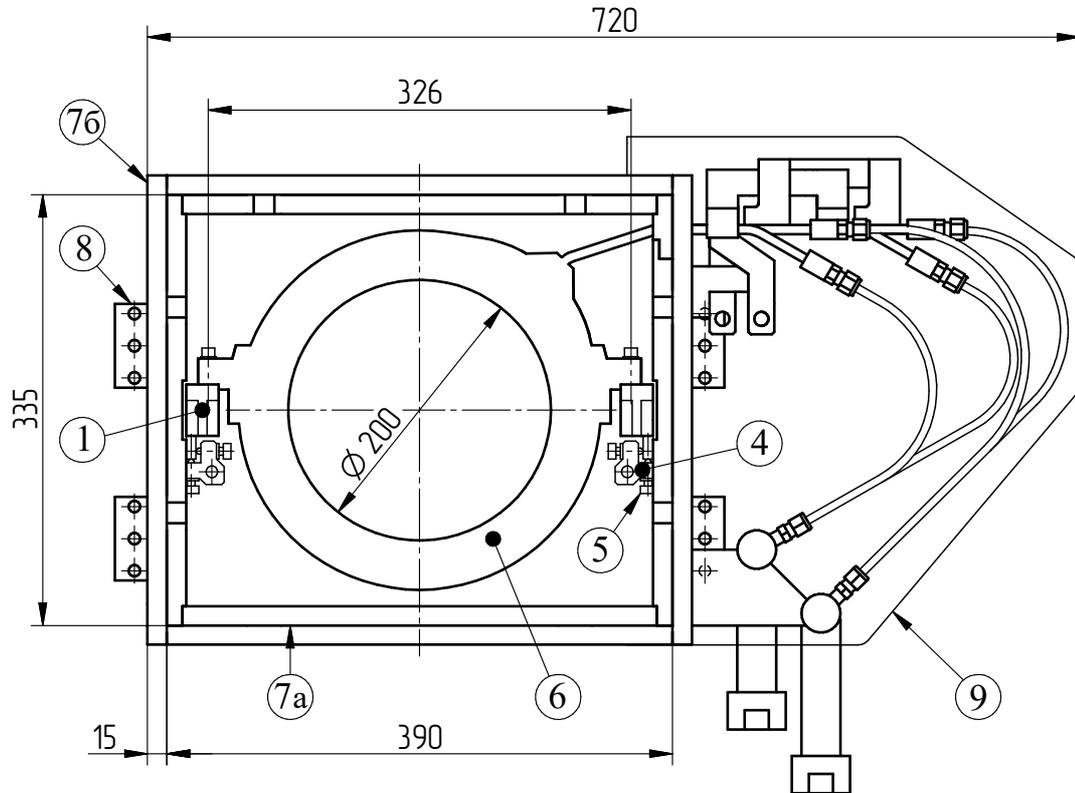


Рисунок 67 – Устройство вставки транспортного канала (поз. 2, 3 не изображены)

Таблица 35 – Техническая характеристика основной обмотки вставки INSERT

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольная
Размеры сечения (по изоляции), $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	19 x 39
Число витков (виток x слой)	10 (5 x 2)
Размеры сечения шинки, $l_{\text{ш}} \times h_{\text{ш}} - d_{\text{отв}}$, мм	7 x 8 - d3
Длина намотки шинки, $L_{\text{ш}}$, м	8,1
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	19 x 342 x 280
Сопротивление (20°C), мОм	2,87
Рассеиваемая мощность, Вт	304
Расход охладителя (вода, $\Delta T=12,5\text{K}$), л/мин	0,35
Падение давления охладителя, бар	0,4
Ток питания, А	318
Номер позиции (рисунок 67)	6

Вставки изготавливаются в различных вариантах исполнений, отличающихся по конструкции корпуса и расположению мест подвода силового питания и охлаждающей жидкости (обозначения по схеме, рисунок 54):

- 1.а) Объединенные в одном корпусе вставки INSERT-2(up)+INSERT-3 (down).
- 1.б) Объединенные в одном корпусе вставки INSERT-2(down)+INSERT-3 (up), как зеркальное отражение вставки INSERT-2(up)+INSERT-3 (down), (п. 1.а).
- 2.а) Вставка INSERT-1(up) без нижней стенки корпуса, устанавливаемая на крышке соленоида LINE18-2(down).
- 2.б) Вставка INSERT-4(up) без нижней стенки корпуса, устанавливаемая на крышке соленоида LINE18-1(down) – зеркальное отражение вставки INSERT-1(up), (п. 2.а).
- 3) Вставки INSERT-1 (down), INSERT-4 (down), INSERT-5 (down) и INSERT-5 (up) – одиночные вставки с днищем (замкнутым корпусом).

Техническая характеристика вставок с конструкцией, описанной в пп.2, 3, приведена в таблице 36. Все вставки (пп.1–3) заполняются обмотками, намотанными противоположно направленными парами (левая и правая намотка), в одном типоразмере, содержащим 10 витков (5 x 2 слоя). Число обмоток в одном канале сохраняется постоянным, равным 10. Обмотки изготовлены из проводника прямоугольного сечения с каналом для охлаждающей жидкости и пропитаны эпоксидным компаундом горячего отверждения.

Таблица 36 – Техническая характеристика вставки транспортного канала.

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Число основных обмоток на канал, шт	10
Сопротивление основных обмоток на канал, (20°C) Ом	28,7
Рассеиваемая мощность на канал (два канала), кВт	3,1 (6,2)
Расход охладителя на канал (два канала), (вода, $\Delta T=12,5K$), л/мин	3,5 (7,0)
Падение давления охладителя, бар	0,4
Ток основных обмоток, А	318
Вес одиночной вставки ¹ (без нижней стенки корпуса), кг	122 (99)
Габаритные размеры одиночной вставки ² , В x L x Н, мм	720x433x510

¹ Вес двойных вставок равен 243 кг.

² Габаритные размеры двойных вставок составляют 760 x 433 x 830 (В x L x Н, мм).

Глава 4 Высоковольтная часть

Система электронного охлаждения коллайдера NICA, рассчитанная на использование электронных пучков с энергиями до 2,5 МэВ, требует наличия не только источника электронов, но и достаточно мощного ускорителя электронного пучка, высоковольтный потенциал которого обеспечивается высоковольтной колонной, состоящей из 46 секций (рисунок 68) высотой по 50 мм.

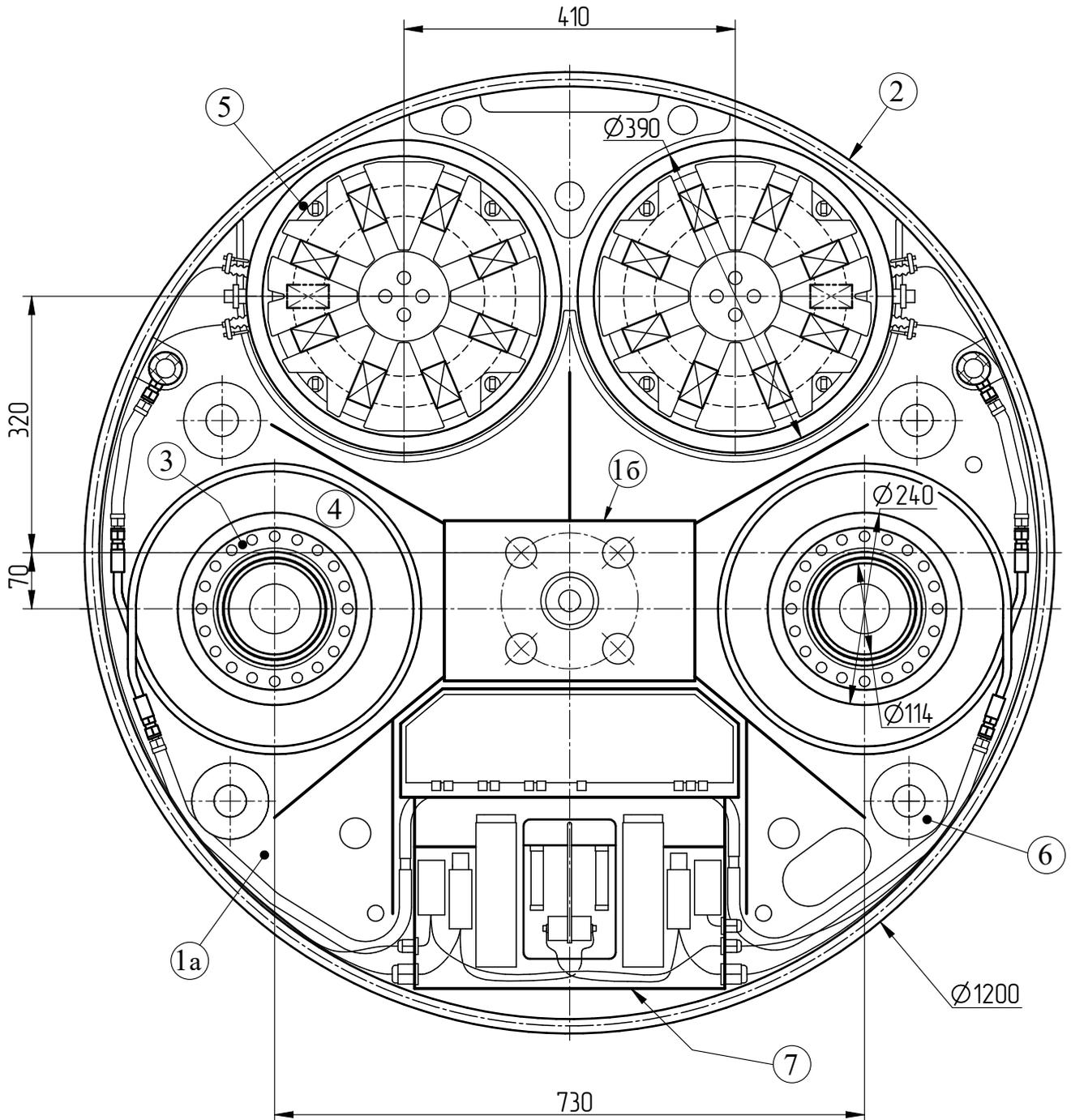


Рисунок 68 – Устройство секции высоковольтной колонны

Ускоряющая система требует организация питания высоковольтной части, необходимой высоковольтной изоляции, охлаждения, и конечно, электронных систем связи и управления.

В высоковольтной части СЭО размещается и электронная пушка, позволяющая управлять профилем электронного пучка [66, 67, 68, 69]. Электронная пушка может создавать пучок с увеличивающейся плотностью электронов от его центра – наружу, позволяя добиться одинаковой скорости охлаждения ионов¹. Она (пушка) располагается на верху высоковольтной колонны (1, рисунок 69), 46 секций которой расставлены с шагом в 64 мм. Шаг расстановки высоковольтных секций обеспечивается изоляторами (6, рисунок 68). Внутри секций размещаются трубки ускорителя/рекуператора (3), которые формируют ускорительный (замедляющий) тракт длиной немногим менее 3 м, и каскадный трансформатор. Исключение составляют 4 пустых секции, расположенные на уровне 1600 мм от фланца бака (рисунок 69), что будет пояснено далее.

Питание высоковольтных устройств осуществляется при помощи каскадного трансформатора (5, рисунок 68), организованного по схеме, ранее применявшейся в электронном охлаждении COSY [70]. Он состоит из чередующихся секций. Магнитопровод трансформатора изготовлен из нанокристаллического магнитомягкого железного сплава (5БДСР) [71], позволяющего получить высокую индукцию при низкой коэрцитивной силе. Техническая характеристика каскадного трансформатора приведена в таблице 37.

Таблица 37 – Техническая характеристика каскадного трансформатора

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Максимальное рабочее напряжение, В	600
Максимальный рабочий ток в одной ветви, А	35
Максимальный полный рабочий ток, А	70
Максимальная полная мощность, кВт	40
Полные потери, кВт	< 7
Рабочая магнитная индукция, кГс	2
Число витков силовой обмотки	8
Сопротивление силовой обмотки постоянному току, Ом	0,015

¹ Необходимость управления профилем электронного пучка обусловлена интенсивностью охлаждения ионов с различными амплитудами бетатронных колебаний, что позволяет избежать пучка с плотной центральной областью и медленно охлаждаемым краем (бóльшие бетатронные колебания), приводящим к развитию неустойчивостей различного рода, и снижения потери ионов за счет рекомбинации на участке охлаждения [68], [69].

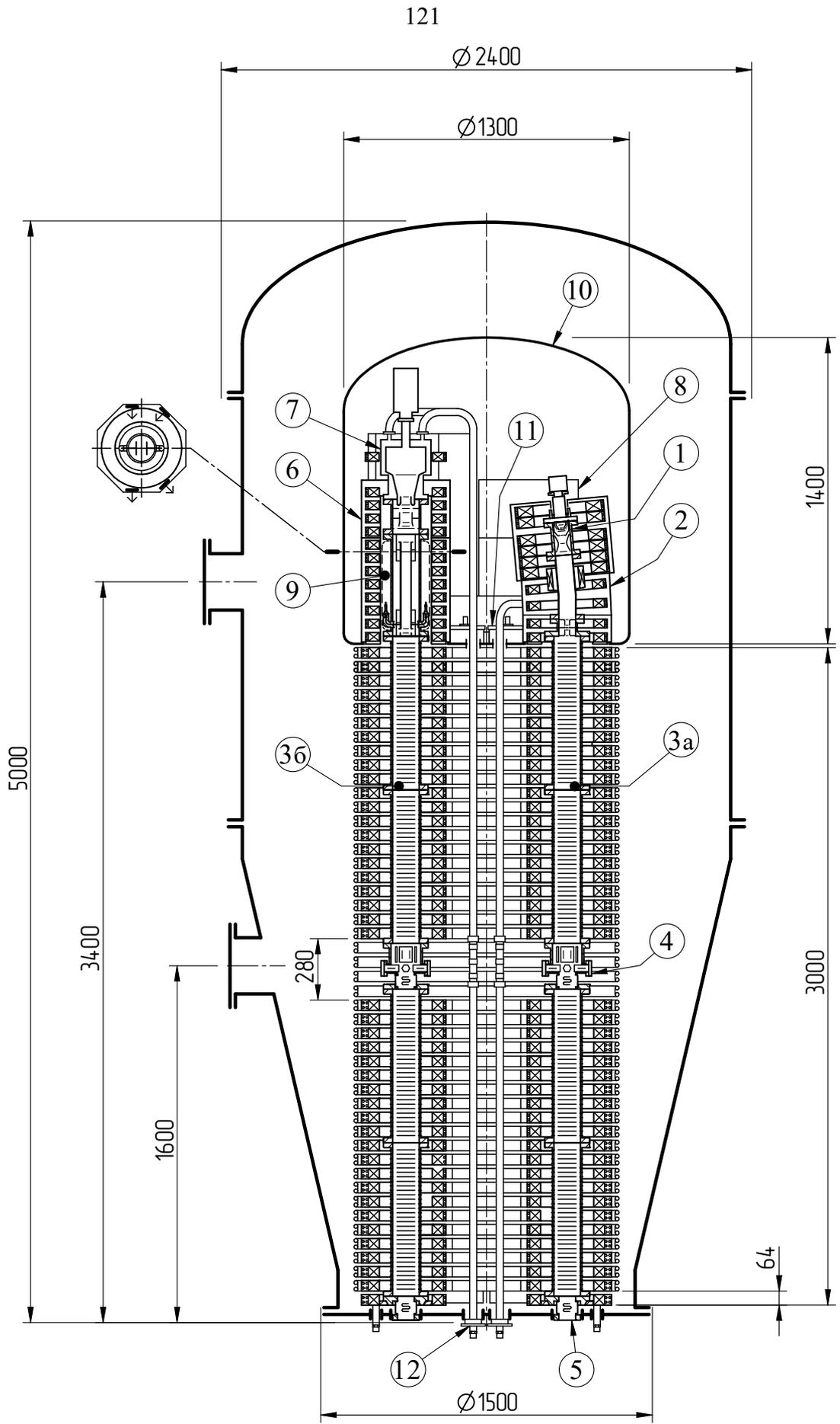


Рисунок 69 – Устройство высоковольтного объема:
 пушка (1) и соленоид пушки (2) изображены условно повернутыми на 90° влево

Организован каскадный трансформатор следующим образом: на его магнитопроводе находятся восемь силовых обмоток, размещенных крест на крест (четыре обмотки передачи мощности на верхнюю секцию, четыре обмотки связи с нижним трансформатором), и обмотка отбора мощности для питания высоковольтной секции (рисунок 68, обозначена штриховой линией с двумя точками). Для защиты от высоковольтных пробоев секции трансформатора содержат разрядник, предотвращающий прохождение разрядов по конструкции трансформатора.

Потенциал высоковольтного терминала составляет 2500 кВ, такое напряжение достигается с шагом по 60 кВ/каскад [72], при этом тепловые потери в трансформаторе составляют около 15 кВт.

Обмотки (4, рисунок 68) формируют ведущее поле величиной 0,5 кГс для транспортировки электронного пучка. Блок питания обмоток (4), высоковольтный выпрямитель и электроника связи и управления секцией размещаются в металлическом корпусе (7) защищающем компоненты от высоковольтных разрядов. Узлы секции закрепляются на металлическом листе (1а), усиленном ребрами жесткости (1б). Снаружи секции располагаются защитные (охранные) кольца (2).

Все части высоковольтной системы помещаются внутри высоковольтного объема (бака, рисунок 69, фотография высоковольтных баков приведена на рисунке Б.12), в котором создается избыточное давление до 8 бар элегаза (SF₆) [72]. Нижний фланец бака устанавливается на опору (1в, рисунок 63), и на него последовательно устанавливаются секции колонны до уровня в 3 м (рисунок 69), после чего на колонне монтируется высоковольтный терминал:

а) электронная пушка (1, рисунок 69) с системами отклонения и фокусировки пучка, размещенная внутри соленоида (2), соединяется с ускоряющей трубкой (3а), в средней части которой устанавливается узел (4) с дополнительным оборудованием откачки, датчиком положения пучка и сильфоном; место, в котором устанавливается дополнительное откачное оборудование, размещается внутри четырех не заполненных секций; на выходе из фланца бака располагается присоединительный фланец (5) сильфонного узла основания ускоряющей трубки¹;

б) замедляющая трубка (3б, рисунок 69) полностью повторяет конструкцию ускоряющей трубки (3а), но на вершине высоковольтной колонны устанавливается соленоид коллектора (6) с фильтром Вина (9) и коллектор электронов (7), содержащий супрессор и приколлекторный электрод.

Используемый коллекторный узел показала высокую способность рекуперации энергии с эффективностью более чем 10^{-6} при токе в 0,9 А [73] в системе электронного охлаждения

¹ Для компенсации деформаций опорного фланца высоковольтного объема, возникающих от избыточного давления, присоединительные фланцы имеют специальную сферическую развязку.

COSY. Фильтр Вина коллекторного узла позволяет реализовать идею перехвата отраженных от коллектора электронов за счет скрещенных магнитного (поперечного) и электрического полей [74], не вызывая при этом отклонения основного пучка электронов¹. Поперечное магнитное поле фильтра создается за счет использования 24 постоянных магнитов², выполненных в форме параллелепипедов с размерами 40x44x4 мм.

Постоянные магниты фильтра Вина размещаются на четырех пластинах корпуса в нижней части соленоида коллектора (6, рисунок 69) до диафрагмы, отделяющей приколлекторный электрод и супрессор. Их расположение приведено в разрезе фильтра изображенном на рисунке 69, где стрелками указан вектор намагниченности. Остаточная намагниченность постоянных магнитов составляет 13 кГс. Общее расположение магнитов и их размеры обусловлены формированием магнитного поля с градиентом 0,5 для электронов с энергией 20 кэВ, интеграл которого на оси фильтра равен 1400 Гс·см.

Следует отметить, что конструкция пушки системы электронного охлаждения выполнена таким образом, что ее ось имеет небольшой угол наклона (5°) от вертикальной плоскости в сторону каскадного трансформатора [72], что сделано для предотвращения бомбардировки оксидного катода вторичными ионами, движущимися навстречу электронному пучку и способными вызвать сильную деградацию эмиссионной способности катода. Электронная пушка рассчитана на длительную работу с электронным током в 1 А, при анодном напряжении порядка 5 кВ.

Высоковольтный терминал закрывается крышкой (10, рисунок 69), максимальные значения электрического поля на поверхности которой находятся в диапазоне 110-120 кВ/см. Под крышкой высоковольтного терминала также располагаются блоки управляющей электроники (8) и выводы колонн каскадного трансформатора (11).

Гидравлическая система охлаждения (12, рисунок 69) узлов высоковольтной системы (обмотки магнитного поля, трансформатор, электроника, коллектор, пушка) выполнена на трансформаторном масле. Подача, очистка и охлаждение рабочего теплоносителя выполняется масляной станцией, находящейся в составе СЭО. Подаваемый по нескольким контурам теплоноситель охлаждает ускоряющую и замедляющую колонны, секции каскадного трансформатора и высоковольтный терминал. Вывод сливных и ввод подающих магистралей от фланца высоковольтного объема к масляной станции организуются в пространстве между опорными стойками кольца (1в, рисунок 63), таким образом, чтобы не загромождать проем между опорами (1а и 1б).

¹ Действие поперечных сил от магнитных полей фильтра на электронный пучок компенсируется, а обратный поток частиц отклоняется в сторону и поглощается коллектором вторичных электронов.

² Главными плюсами использования постоянных магнитов являются отсутствие необходимости организации дополнительного питания и охлаждения в конструкции коллектора; минусом – отсутствие гибкости такой системы.

Глава 5 Система измерений и коррекции электронного пучка

Система измерений электронного пучка (одновременного измерения ионного и электронного пучков) в значительной степени выходит за пределы темы диссертации, однако, можно выделить некоторые аспекты, касающиеся именно конструкции и расположения датчиков положения электронного пучка (рисунок 70). К датчикам предъявлялись следующие требования: компактность размещения вакуумных выводов (особенно на участке охлаждения); учет возможности надежного соединения сигнальных кабелей на разъемах датчиков; требования к теплостойкости кабелей (возможность выдержать температуру 300-400 С); повторяемость пластин, формирующих сигнал датчиков; использование немагнитных материалов для вводов и кабелей; обеспечение защиты пластин датчиков от прямого попадания электронного тока на поверхность электродов и обеспечение вакуума в 10^{-11} мбар.

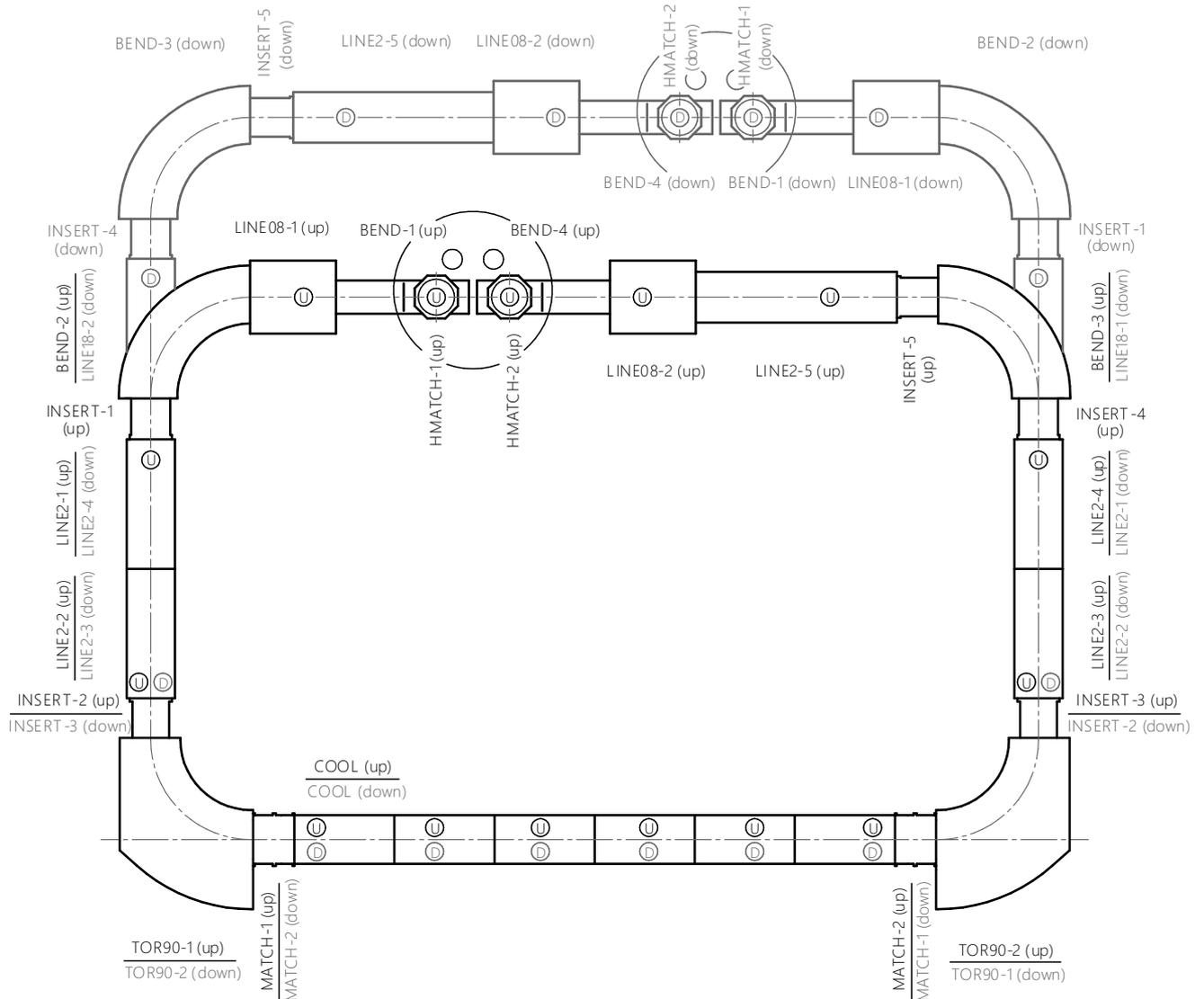


Рисунок 70 – Схема расположения датчиков положения пучков:

U – датчики верхнего канала; D – датчики нижнего канала

Всего в установке используется 34 датчика положения пучка. Из которых 30 распределены по двум каналам магнитной системы установки (рисунок 70): 18 датчиков распределены на 2 канала транспортной системы и 12 – на 2 канала соленоида охлаждения. Оставшиеся 4 датчика положения установлены внутри двух высоковольтных баков.

Коррекция электронного пучка, главным образом, организована за счет использования двух типов корректоров: 1) корректоры формы и положения пучка (рисунок 71); 2) дипольные корректоры ларморовского вращения пучка как целого – EDIP (рисунок 72). Дополнительно предусмотрена возможность вращения фазы в соленоидах транспортной системы и соленоиде охлаждения и возможность, при необходимости, использовать согласующие секции (HMATCH, MATCH, INSERT) как аксиально симметричные линзы.

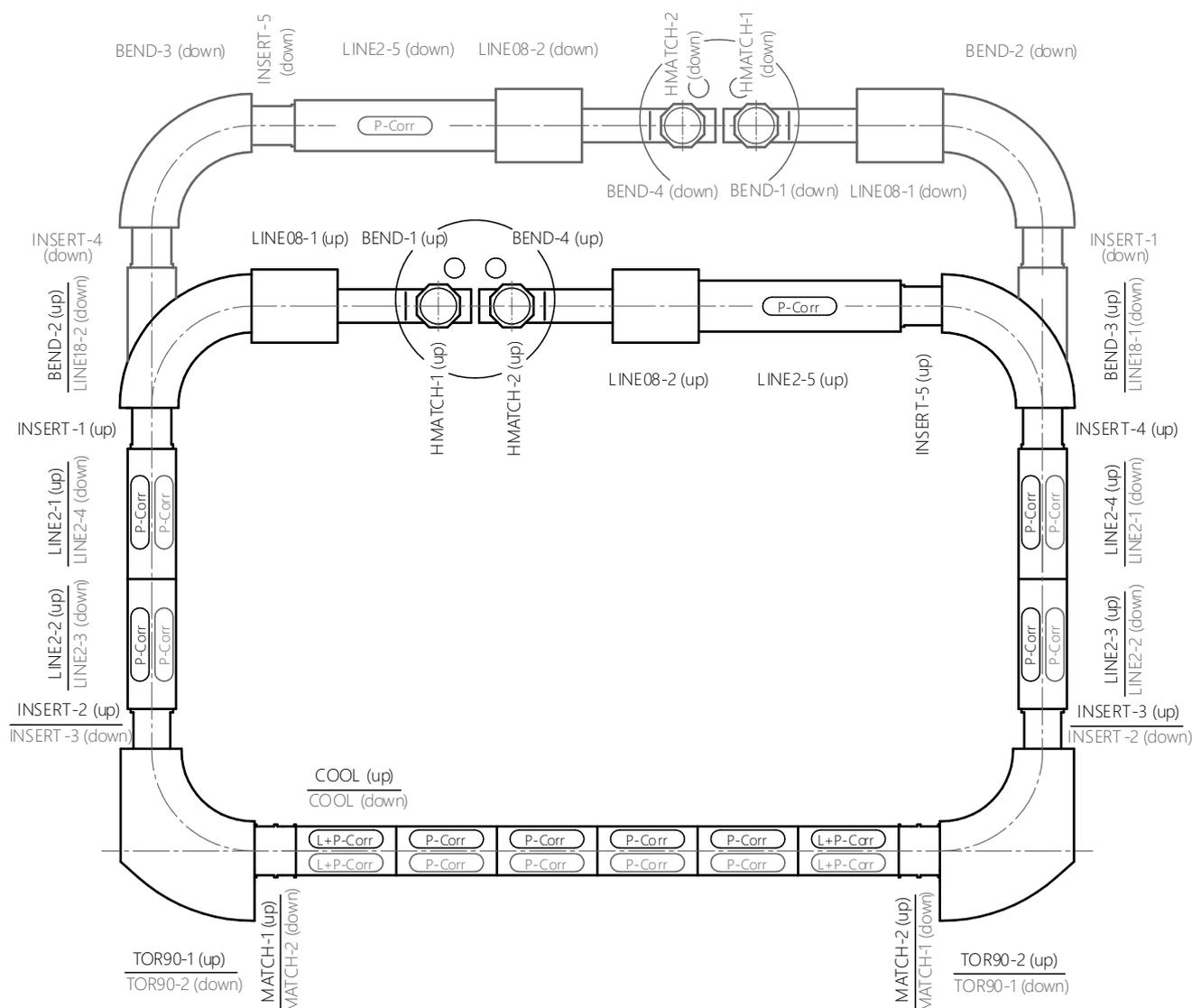


Рисунок 71 – Схема расположения корректоров положения и формы пучка:

P-Corr – корректоры формы и положения пучка (плоские обмотки);

L+P-Corr – корректоры формы и положения пучка с обмоткой линейного поля
(ступенчатая обмотка)

Конструкция обмоток, составляющих корректоры формы и положения пучка, подробно описывалась в разделах, посвященных изделиям, в которых эти обмотки установлены и являются неотъемлемой частью конструкций магнитных элементов СЭО.

Коррекция (уменьшение) ларморовского вращения пучка осуществляется за счет короткого «ударного» воздействия на движение электронного пучка. Для этого используются магнитные элементы (EDIP) с достаточно короткой длиной обмоток (меньшей чем длина ларморовской спирали) [75], дополняемые магнитными элементами, позволяющими реализовать вращение фазы (набег фазы циклотронного движения) за счет изменения продольного магнитного поля этих элементов.

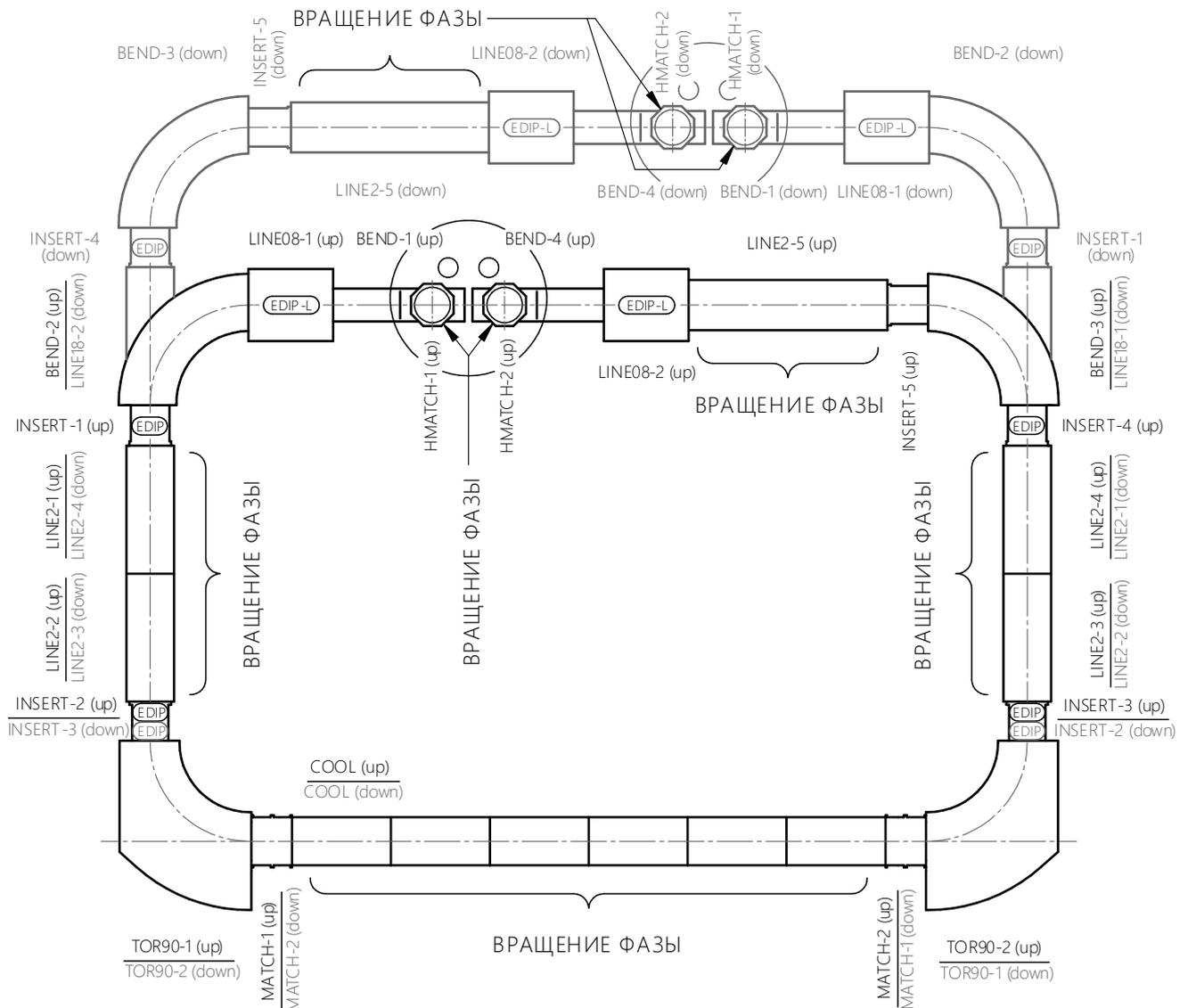


Рисунок 72 – Схема расположения дипольных корректоров

ларморовского вращения пучка как целого:

EDIP – корректоры вставок (INSERT) транспортного канала;

EDIP-L – корректоры соленоидов (LINE08)

5.1 Датчики положения электронного и ионного пучков

Для диагностики электронного и ионного пучков в СЭО коллайдера NICA используются электростатические четырех электродные датчики с заземлением на корпус вакуумной камеры [76]. На начальных стадиях проектирования СЭО, исходя из опыта производства подобных изделий, было принято решение унифицировать датчики положения пучков и изготовить их серийно, чтобы готовые изделия можно было сразу устанавливать в разрывы труб вакуумных камер установки. Итоговая конструкция узла изображена на рисунке 73, где в корпусе (1) размещается устройство, состоящее из четырех электродов (2), точность расположения которых задается применением кольцевой оправки (3а). К оправке электроды (2) крепятся через керамические изоляторы (3б). Вывод сигнального проводника от электродов (2) осуществляется через вакуумные вводы (4), защищенные от механических воздействий корпусами с крышкой (5), выполненными из сплава Д16. Электроды, оправка и корпус (2, 3а и 1) изготавливаются из нержавеющей стали с магнитной проницаемостью $\mu \leq 1,05$. Корпус (1) представляет из себя сварную конструкцию из коротких отрезков цельнотянутых труб с кольцевыми переходами (бортами), обеспечивающими расширение в зоне расположения электродов (2).

Геометрия разделки и расположение сварных швов корпуса проектировались с учетом предъявляемых требований на вакуум: в местах сварных соединений не должно оставаться узких внутренних щелей (непроваренных стыков кромок деталей). Потому что получение вакуума 10^{-11} мбар определяется, в том числе, и требованиями хорошей откачиваемости конструкции и высокого качества выполнения сварных швов.

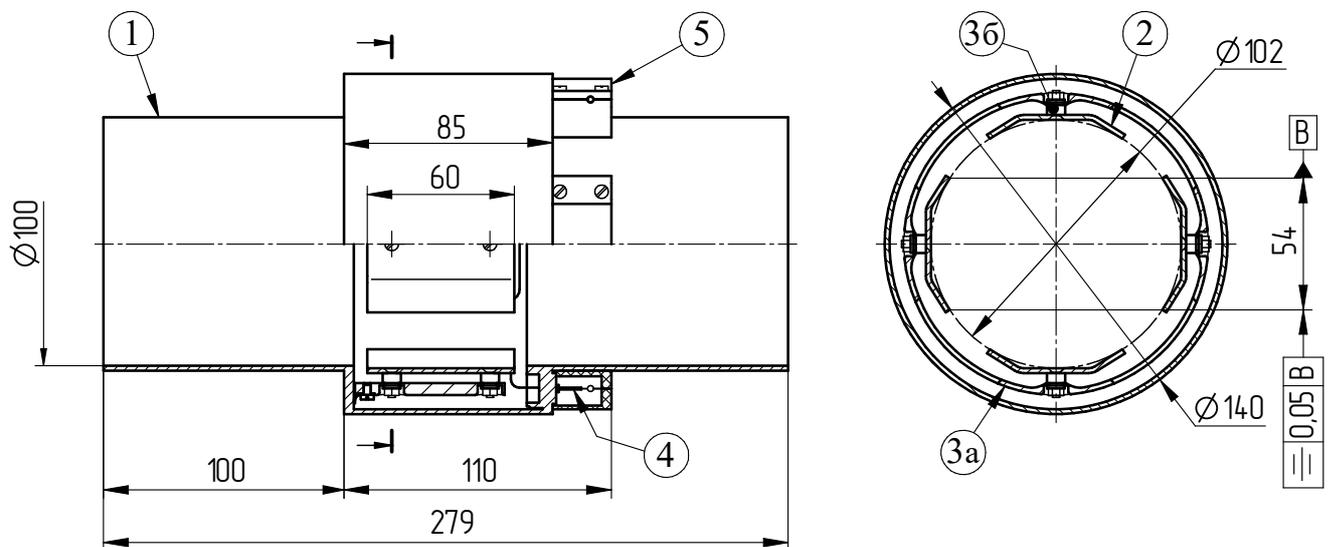


Рисунок 73 – Конструкция узла датчика положения пучка

Одна из особенностей изделия заключается в том, что условия прогрева вакуумных камер не позволяет использовать низкотемпературную пайку сигнальных проводников, поэтому для соединений цепи сигнальных проводников применена контактная сварка, которая произведена силами специалистов лаборатории 5-2 института.

Датчики положения пучков, выполненные как готовое (законченное изделие), устанавливаются в разрывы труб вакуумных камер на требуемых местах согласно схеме их расстановки (рисунок 70). Азимутальное положение электродов (в камерах с несколькими датчиками положения пучков) достаточно легко контролируется за счет контактных блоков, расположенных на корпусе датчика. К недостаткам данного типа конструкции можно отнести увеличенное количество сварных швов, однако, конфигурация этих швов настолько простая (стыковой шов двух труб), что не вызывает каких-то серьезных опасений.

5.2 Дипольные корректоры ларморовского вращения

В установке электронного охлаждения используется два типа корректоров ларморовского вращения, имеющих существенные конструктивные отличия. Корректоры первого типа (EDIP, рисунок 72) устанавливаются в очень тесном месте – во вставках транспортного канала (фотография приведена на рисунке Б.10). Где внутреннее пространство ограничено сальфоном вакуумной камеры с диаметром 130 мм, а внешнее – апертурой обмоток продольного поля диаметром 202 мм. В этом месте величина радиального зазора получается равной всего 36 мм, что и определяет пространство, в котором необходимо разместить обмотки формирующие магнитное поля корректора.

Дипольный корректор вставки транспортного канала EDIP состоит из восьми коротких обмоток (1б, рисунок 74), каждая из которых наматывается на сварном каркасе (оправке) из немагнитной стали (1а) в пределах сектора кольца с углом в 28° . После намотки обмотки собираются на двух парах полуколец (2), позволяющих разместить по четыре каркаса (1а). Собранные таким образом половинки дипольного корректора соединяются друг с другом при помощи крепежных скоб (3). Корректоры устанавливаются внутри вставок транспортного канала INSERT на направляющие (1, рисунок 67) согласно схеме расположения (рисунок 72). Продольное положение блока корректора ограничивается за счет того, что пластины его радиатора (5, рисунок 74), предназначенные для увеличения теплоотвода от обмоток при прогреве вакуумной камеры, плотно прижимаются обмотками ведущего поля (6, рисунок 67) вставки транспортного канала INSERT. Для защиты электрической коммутации обмоток от механических повреждений выводы обмоток (1б, рисунок 74) закрываются защитными пластинами (6), выполненными в форме двух полуколец.

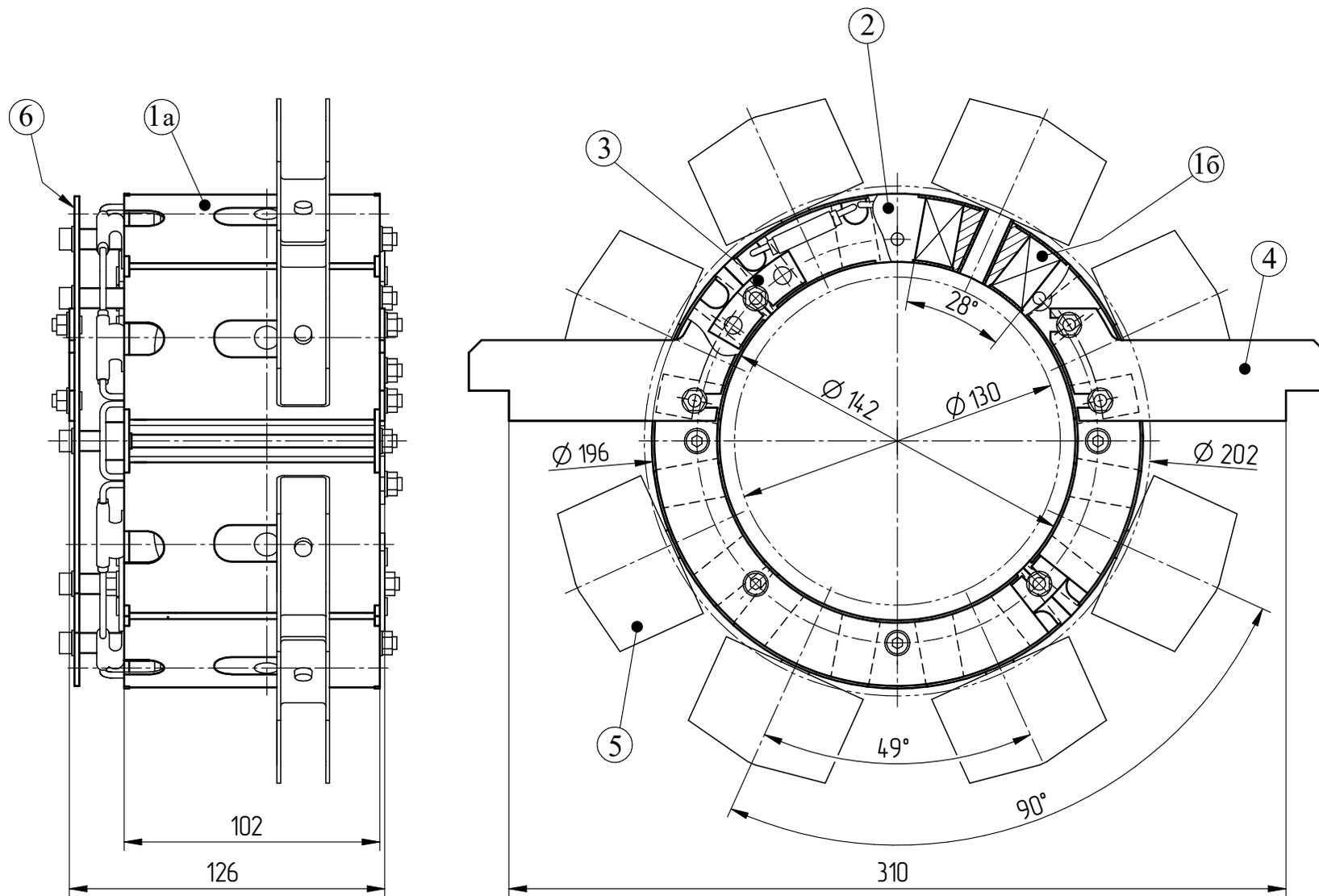


Рисунок 74 – Конструкция дипольного корректора ларморовского вращения вставки транспортного канала (INSERT)

Техническая сложность изделия обусловлена тем, что корректор располагается над прогреваемой (до 300-400°C) вакуумной камерой, вследствие чего он должен обладать высокой температурной стойкостью, что ограничивает: применяемость проводников, пригодных для намотки, и изоляционных материалов; исключает пропитку эпоксидным компаундом и использование легкоплавких припоев. В конструкции данного корректора используется обмоточный провод в стеклотканевой изоляции (марки ПСДКТ) [77], наматываемый на оправку без пропитки¹. С целью закрепления витков от сползания при намотке использовался контактный (цианоакрилатный клей), который наносился локально (точками). Нанесение клеевых точек особенно актуально для удержания витков на торцевых поверхностях обмотки (где витки укладываются по кольцу, формируя тороидальную поверхность). И выгорание клея при прогреве вакуумной камеры не приведет к потере формы обмотками.

Каждая единичная обмотка корректора обладает характеристикой соответствующей данным таблицы 38.

Таблица 38 – Техническая характеристика единичной обмотки корректора вставки транспортного канала (INSERT)

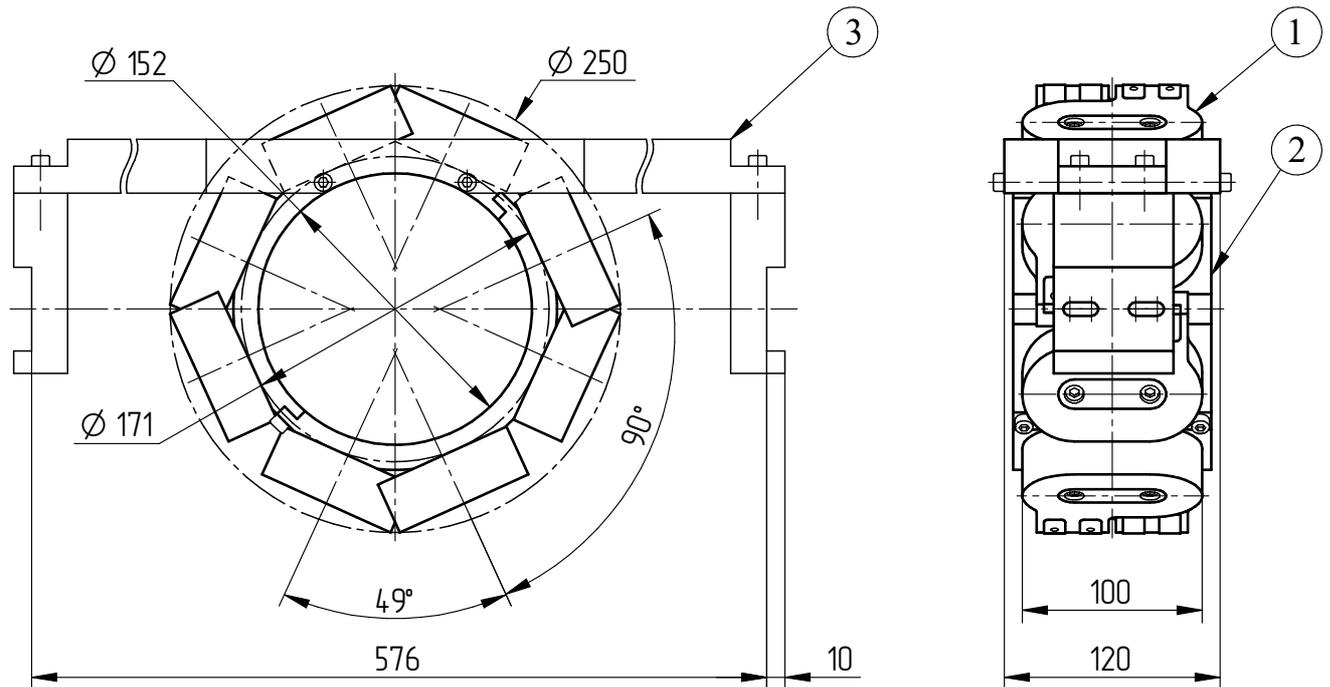
ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	четырёхугольное ²
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	15,4 x 24
Число витков (виток x слой)	60 (6 x 10)
Марка проводника	ПСДКТ
Диаметр проводника, $d_{\text{п}}$ (по меди), мм	2,29 (2,0)
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	10,6
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	65 x 102 x 32
Сопротивление (20°C), (общее), Ом	0,060 (0,48)
Рассеиваемая мощность (общая), Вт	2,2 (17,6)
Ток питания, А	6

¹ Первоначально планировалось использовать кремнийорганический лак, наносимый после намотки каждого слоя проводника, но лак не показал хороших фиксирующих свойств, в следствие чего был исключен из технологии, в виду значительного ее усложнения.

² Сечение обмотки корректора сформировано четырехугольником, боковые стороны которого параллельны, а верхнее и нижнее основания представляют собой дуги. Сама обмотка имеет небольшую седлообразность формы за счет наклона боковых сторон сечения на угол 28° друг относительно друга (рисунок 74).

Коммутационная пайка выводов обмоток (16, рисунок 74) производилась высокотемпературным припоем ПСр15 (640-810°С) [78]. Изоляция мест пайки выполнялась термостойкими силиконовыми трубками. Обмотки изготовлены зеркальными парами с левой и правой намоткой.

Второй более простой, как в технологическом, так и в конструктивном отношении вариант дипольного корректора ларморовского вращения, предназначенный для установки в прямолинейном соленоиде с отсечным шибером LINE08, изображен на рисунке 75.



Рисунке 75 – Конструкция дипольного корректора ларморовского вращения соленоида с отсечным шибером (LINE08)

Положение обмоток (1, рисунок 75) корректора определяется расположением площадок разъемных полуколец (2), к которым эти обмотки крепятся. При помощи кронштейна (3) корректор закрепляется к направляющим соленоида LINE08 (рисунок 54). Внутренний диаметр полуколец корректора равен 152 мм, что определяется диаметром фланцев вакуумной системы установки. Внешний (габаритный) диаметр, описанный по его обмоткам, не вызывает сложностей при размещении корректора внутри обмоток соленоида LINE08, апертура которых равна 400 мм.

Обмотки корректора наматываются на сердечнике из сплава Д16Т с пропиткой эпоксидным компаундом горячего отверждения. Техническая характеристика единичной обмотки корректора приведена в таблице 39.

Таблица 39 – Техническая характеристика единичной обмотки
корректора соленоида с отсечным шиббером (LINE08)

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Форма сечения обмотки	прямоугольное
Размеры сечения по изоляции, $L_{\text{сеч}} \times H_{\text{сеч}}$, мм	20x28,5
Число витков (виток x слой)	144 (16 x 9)
Марки проводника	ПСДТ
Сечение проводника, $l_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ (по меди), мм	1,22x3,11 (0,9x2,8)
Длина намотки проводника, $L_{\text{п}}$, м	30,5
Габаритные размеры, В x L x Н, мм	79 x 100 x 32
Сопротивление (20°C), (общее), Ом	0,218 (1,744)
Рассеиваемая мощность (общая), Вт	7,8 (62,4)
Ток питания, А	6

Глава 6 Вакуумная система

В соответствии с числом каналов магнитной системы установки вакуумная система так же состоит из двух независимых каналов, общий вид которых изображен на рисунке 76. Протяженность и конфигурация каждого канала вакуумной системы определяется полной длиной траектории электронного пучка от пушки до коллектора, к которой добавляются небольшие участки вакуумных камер, соединяющие СЭО с коллайдером NICA.

Оба канала вакуумной системы сконструированы по одним и тем же принципам и, в общем, отличаются только наличием удлиняющих вставок для нижнего канала установки (рисунок 76). Однако, на прямолинейных участках вакуумной системы не только установлены удлиняющие вставки нижнего канала, но и есть различия в расстановке датчиков положения электронного пучка. Расположение датчиков отличается тем, что один из нижней камеры транспортного канала перемещен (в соответствии со схемой расположения датчиков ¹ рисунок 70) в дополнительно установленную удлиняющую вставку.

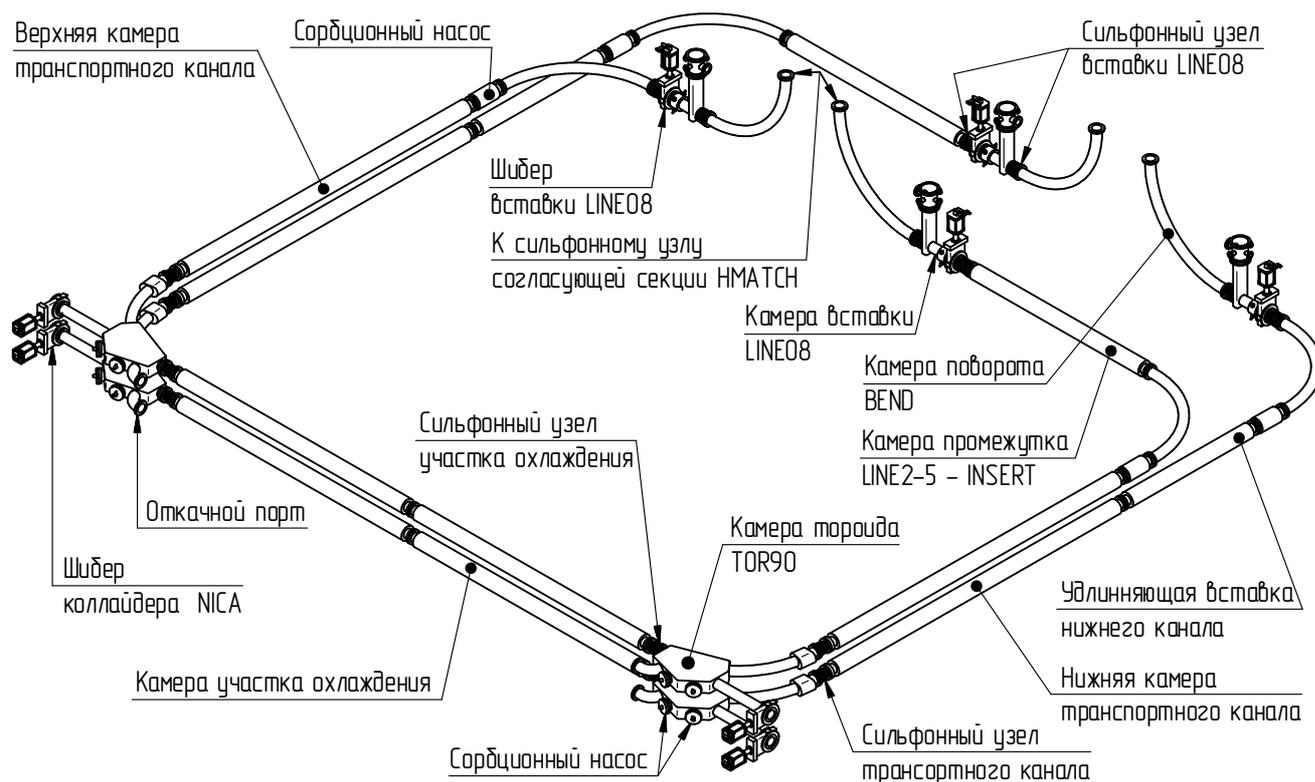


Рисунок 76. Общий вид вакуумной части СЭО, располагающейся внутри элементов магнитной системы, за пределами высоковольтного объема

Каждый канал вакуумной системы установки можно условно поделить на три участка, каждый из которых отделяется от общей системы при помощи шиберов:

¹ Участки LINE 2-1 (down) - LINE 2-2 (down) и LINE 2-3 (down) - LINE 2-4 (down).

- 1) участок соленоида охлаждения с вакуумными камерами тороидов и транспортного канала до соленоидов LINE08-1, LINE08-2 (рисунок 70);
- 2) участок от ускорительных трубок пушек до соленоидов LINE08-1;
- 3) участок от соленоида LINE08-2 до коллектора.

При этом участки 2 и 3 полностью идентичны, как со стороны используемого в них вакуумного оборудования, так и их пространственной конфигурации.

Все элементы вакуумной системы установки изготавливаются из материалов, способных обеспечить ультравысокий вакуум (UHV), главным образом, из нержавеющей стали, меди и керамики. Соединения камер – фланцевые, по типу «конфлат» с металлическим уплотнением [79]. Увеличение скорости десорбции газов с поверхности камер [80] обеспечивается за счет их прогрева до температур в 250..300 °С. Вакуумные камерыгреваются в сборе. Для предотвращения повреждения камер, в конструкции которых находятся многочисленные электрические вводы и керамические изоляторы, скорость набора температуры устанавливается на уровне 0,5 °С/мин. Прогрев осуществляется не менее суток под автоматическим контролем компьютерной системы, оборудованной термосенсорами. Чтобы исключить выход из строя элементов магнитной системы установки из-за теплового воздействия нагревателей вакуумных камер в конструкции предусмотрена внешняя теплоизоляция и установлены защитные кожухи где это возможно.

Для достижения требуемых величин давления вакуума во время прогрева и при активации геттерных насосов необходимо использование черновой откачки. Использование модулей типа Pfeiffer «HiCube Classic»¹ [81] позволяет организовать работу в режиме получения чернового вакуума 10⁻⁹ мбар, при откачке со скоростью до 300 л/сек. Модули оборудованы измерителем вакуума в диапазоне 1000÷5×10⁻⁹ мбар. К основным объемам вакуумных камер пост черновой откачки присоединяется через отсечной пневматический клапан.

Общая длина вакуумных камер составляет величину немногим менее 70 м, из которых около 12 м – ускоряющие и замедляющие трубки, выполненные из паяной керамики, расположенные внутри высоковольтного объема (рисунок 77), заполненного элегазом (SF₆). Внешнее сопряжение ускоряющих и замедляющих трубок (вывод из высоковольтного объема) осуществляется посредством специальных (усиленных) сильфонных узлов. Перепад давления газов на этих сильфонных узлах может составлять до 8..10 бар, и их конструкция помимо стандартного вакуумного фланца предусматривает наружное уплотнение (5, рисунок 69). В области ускорительных колонн требуется получение вакуума с давлением выше 10⁻¹⁰ мбар.

¹ На схемах, приведенных в данной главе, подключения откачных модулей изображены штриховой линией.

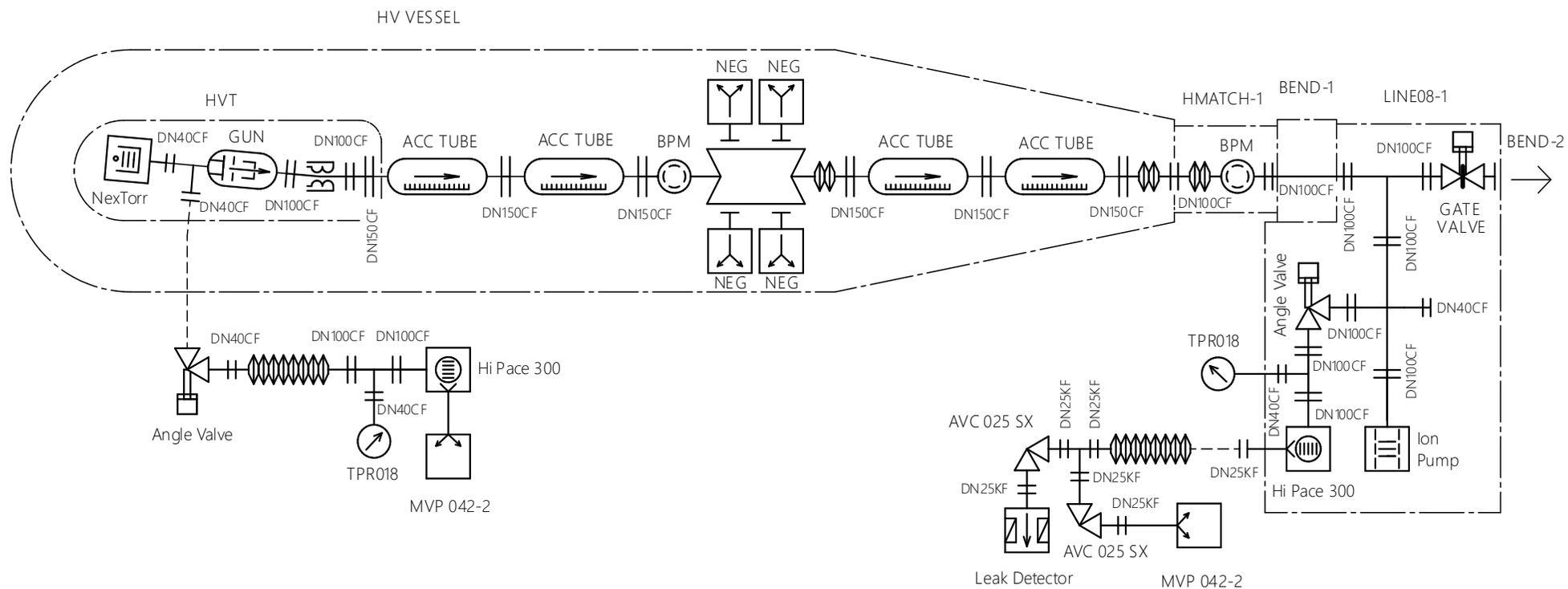


Рисунок 77 – Принципиальная схема участка вакуумной системы пушки СЭО

В процессе осуществления монтажа и прогрева камер электростатического ускорителя необходима организация специального (временного) вакуумного стенда, предусматривающего: тестирование утечек, прогрев под вакуумной откачкой, измерение масс-спектра остаточных газов.

Вакуумные камеры транспортной части установки на участках LINE08-TOR90 имеют общие принципы организации (рисунок 78), но отличаются наличием камер промежутка LINE2-5 – INSERT и удлиняющей вставки нижнего канала (что было пояснено ранее). Со стороны тороидов (TOR-1, TOR-2) в примыкающих к ним вставках (INSERT-2, INSERT-3 рисунки 54, 79) расположены сильфонные узлы, предназначенные не только для компенсации продольных тепловых деформаций вакуумных камер, но и для осуществления финальной сборки вакуумных частей транспортных каналов и участка охлаждения. Откачка транспортных каналов осуществляется через порты, размещенные в камерах тороидов (TOR-1, TOR-2 рисунки 54, 79). Для распределенной откачки во вставках транспортного канала (INSERT-1 (up/down), INSERT-4 (up/down), рисунок 54) установлены дополнительные вставки с сорбционными насосами типа SAES «UHV Wafer Modules» [82].

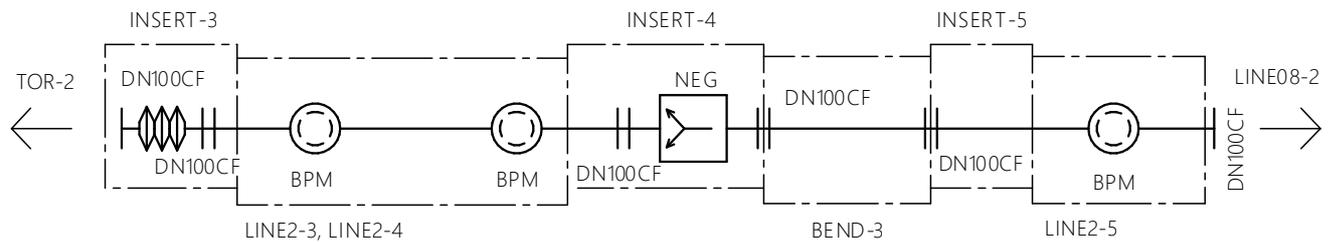


Рисунок 78 – Принципиальная схема участка вакуумной системы транспортного канала СЭО

Устройство вакуумной системы на участке охлаждения в промежутке между отсечными шиберами коллайдера дано в виде принципиальной вакуумной схемы, представленной на рисунке 79. На участке охлаждения (в каждом канале СЭО) устанавливаются прямолинейные камеры соленоида (COOL) с датчиками положения пучка (BPM), причем в средней части соленоида находится фланцевое соединение, делящее этот участок на две равных (полностью взаимозаменяемых) части длиной около 3,2 м.

Внутри основного объема вакуумных камер тороидов (TOR-1, TOR-2 рисунки 54, 79) располагаются дополнительные сорбционные насосы типа SAES «СаpaciTorr D/Z (UHV)» [82]. К фланцам откачных портов, выведенным за пределы корпуса тороидов, присоединяются турбомолекулярные насосы типа Pfeiffer «Hi Pace 300» [81] (или аналогичные) и другое вакуумное оборудование.

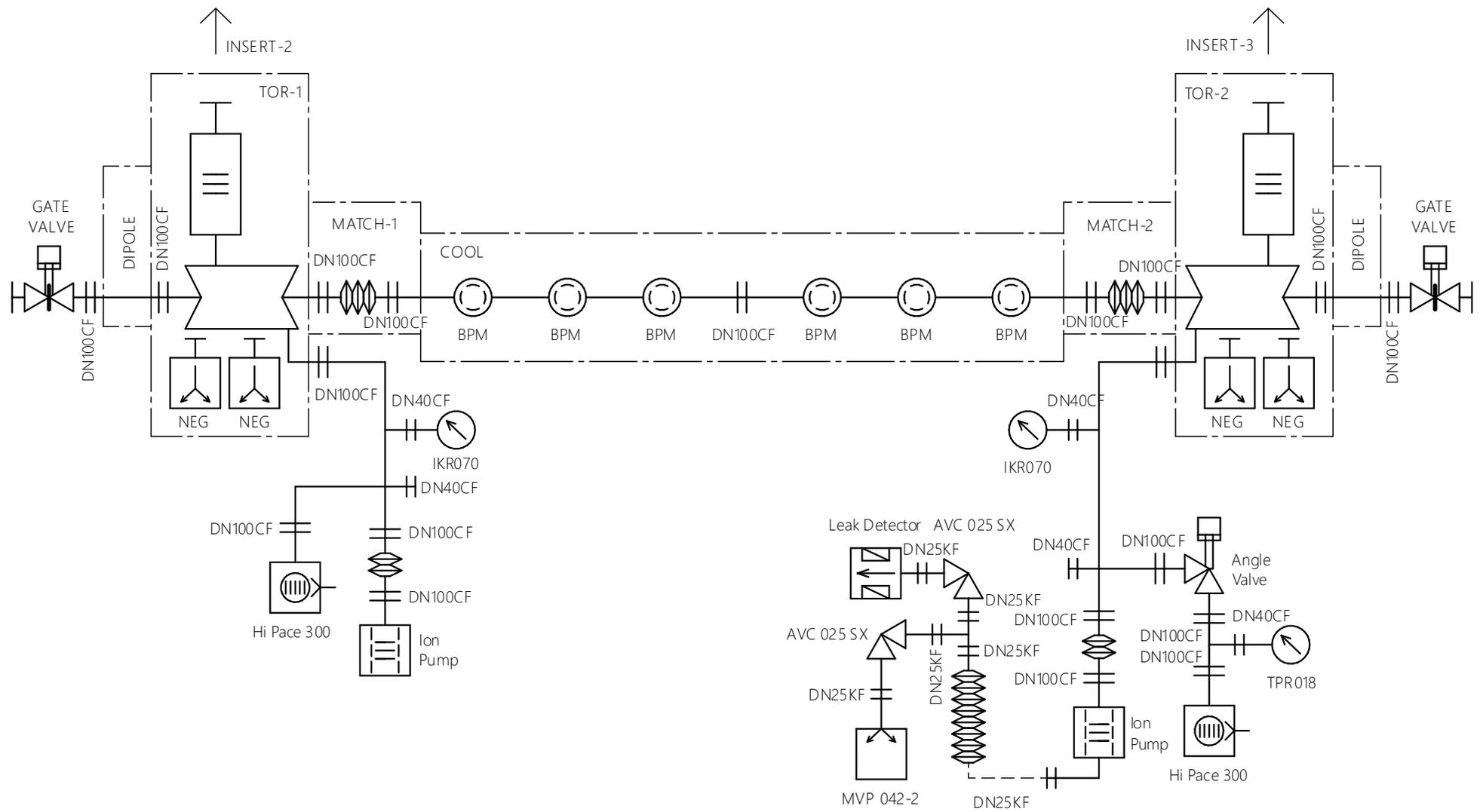


Рисунок 79 – Схема участка вакуумной системы в центральной части СЭО

Замыкание вакуумных камер участка охлаждения осуществляется за счет установки сильфонных узлов, расположенных внутри согласующих секций (MATCH-1, MATCH-2 рисунки 54, 79), после выполнения всех остальных соединений данного участка. Сильфонные узлы выполнены на основе сварных сильфонов, которые позволяют компенсировать значительное линейное удлинение камер при прогреве вакуумной системы.

Давление вакуума на участке охлаждения 10^{-11} мбар.

Большинство вакуумных камер СЭО представляет собой прямые трубы (рисунок 80) с внутренним диаметром 100 мм (1а), отличающиеся длинами и числом установленных датчиков положения пучка (2). Соединение камер осуществляется при помощи фланцев DN100CF (1б, с наружным диаметром равным 152 мм). На внешнюю поверхность вакуумной камеры (1а) монтируются прогревающие элементы, после чего камера оборачивается стекловолоконной изоляцией (5), для предотвращения задиранья изоляционного материала камера помещается в кожух (5), выполненный из трубы с наружным диаметром 160 мм. Центровка кожуха относительно вакуумной камеры обеспечивается за счет направляющих колец (4), изготовленных из фторопласта. Металлические части вакуумных камер изготавливаются из коррозионностойкой легированной стали с магнитной проницаемостью $\mu \leq 1,05$.

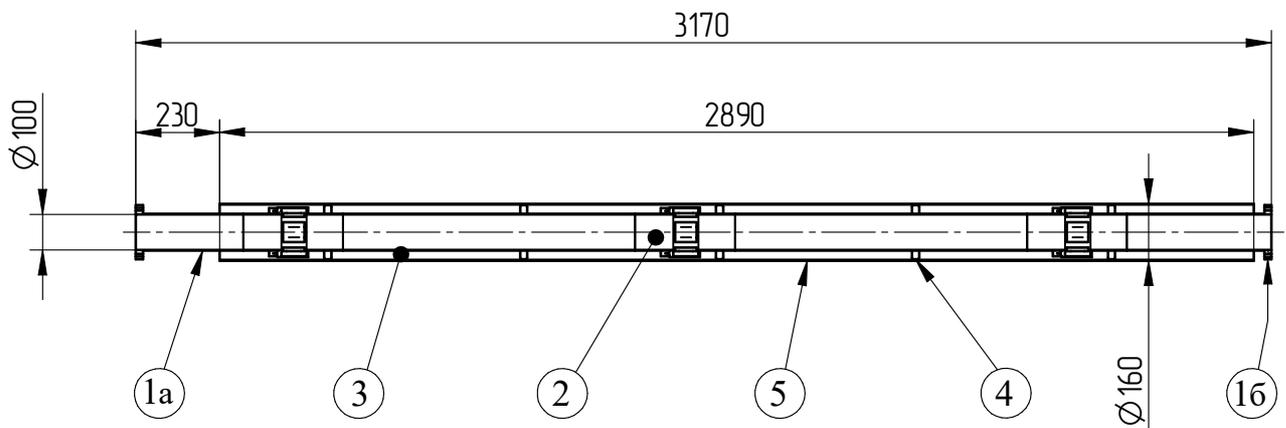


Рисунок 80 – Продольный разрез вакуумной камеры соленоида охлаждения

Вакуумные камеры поворотных соленоидов BEND так же выполнены из труб внутренним диаметром 100 мм, согнутых на угол 90° , с радиусом 1 м по средней линии. Внешний кожух не предусмотрен по причине отсутствия необходимости извлечения камеры из соленоида (камера обматывается только теплоизоляцией).

Наибольшую сложность в изготовлении из всех камер СЭО коллайдера NICA, находящихся за пределами ее высоковольтных объемов, представляет собой камера тороида

(рисунок 81). Основной объем которой выполнен в виде плоской шестиугольной части (1а), внутри которой располагаются: перфорированная труба с окном для проводки электронного пучка (1б), служащая для лучшей согласованности импедансов связи вакуумных камер коллайдера NICA и СЭО¹ [83], и откачные геттерные насосы (3). Наружу через боковой фланец тороида выходит откачной порт (1в). Со стороны входа электронного пучка размещается вставка с очищающими электродами (2), улавливающими частицы, дрейфующие во встречном направлении относительно движения электронного пучка.

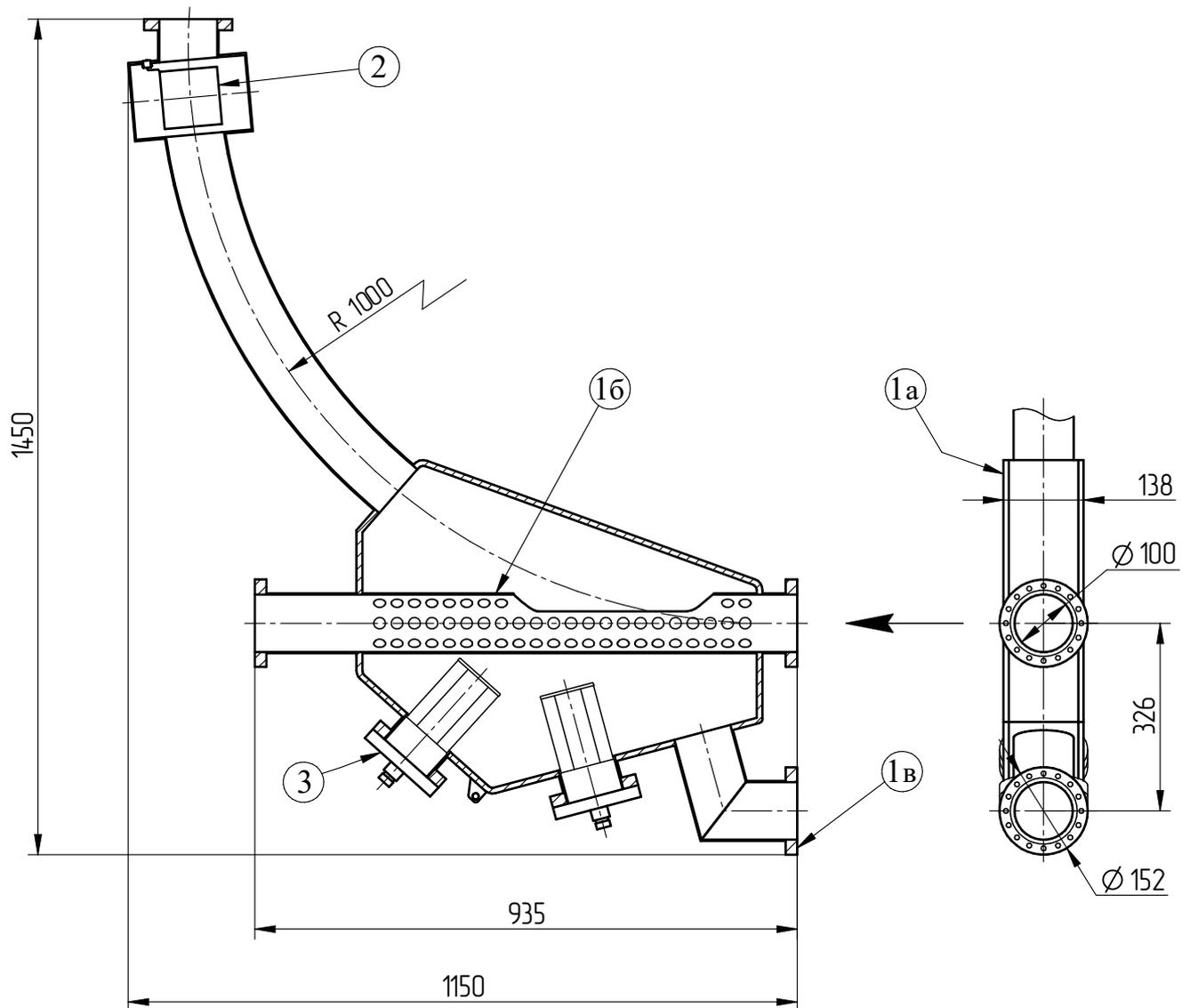


Рисунок 81 – Устройство вакуумной камеры тороида

¹ В этом месте имеется резкое изменение формы камеры (камера меняет форму сечения с окружности на прямоугольник с несимметричным расположением сторон относительно оси ионного пучка), что нежелательно в циклических ускорителях из-за возможности получения различных неустойчивостей пучка и потерь его энергии.

В качестве компенсационных элементов для предотвращения деформаций при прогреве вакуумной системы, главным образом, используются формованные однослойные металлические сильфоны [84].

Оценка изменений длин вакуумных камер, вызванных прогревом, на участках охлаждения (на величину 15,4 мм в сторону тороида от средней точки участка охлаждения или 30,8 мм для всей длины участка суммарно) и прямолинейных участках транспортных каналов (19,2 мм от поворота в сторону тороида для верхнего канала и 26,9 мм для нижнего) показала, что для компенсации этих значений применение однослойных формованных сильфонов не целесообразно¹. По этой причине в сильфонных узлах согласующих секций соленоида охлаждения (MATCH-1, MATCH-2) и примыкающих к тороидам вставках транспортного канала (INSERT-2, INSERT-3) использованы узлы со сварными сильфонами. Использованные сильфоны были индивидуально изготовлены для СЭО коллайдера NICA.

¹ Из-за необходимости компенсации значительных деформаций требуется применять составные узлы из нескольких последовательных сильфонов. Такое решение приводит к увеличению нежелательных неоднородностей вакуумной камеры (импедансы связи) и требует наличия значительных промежутков, отведенных под установку сильфонных узлов.

Заключение

Итогом выполненной работы является конструкция СЭО коллайдера NICA, 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. Все составные части СЭО были изготовлены и успешно испытаны в ИЯФ СО РАН. Наиболее полно результаты выполненной работы можно показать в виде таблицы 40, содержащей основные технические параметры СЭО коллайдера NICA.

Разработанная в ИЯФ СО РАН им. Г.И.Будкера СЭО коллайдера NICA, после ее установки и запуска в ОИЯИ (г. Дубна), будет первой в мире реализацией системы охлаждения ионов, устанавливаемой на коллайдере и при этом спроектированной для независимого одновременного охлаждения двух ионных пучков без перепуска электронного пучка из одного канала коллайдера в другой.

Данная СЭО стала самой большой из спроектированных в настоящее время в ИЯФ СО РАН как по ее характеристическим размерам, так и по числу задействованных в ней компонентов. В целом, работы по конструированию установки продолжались около 5 лет, и многие из изделий, используемых в установке, были разработаны впервые и только по технологиям цифрового прототипирования. Однако, уже на основании материалов, представленных в данной диссертации, можно оценить и перспективы улучшения некоторых инженерных систем установки. Например, можно оптимизировать гидравлический режим охлаждения обмоток тороидов, сделать его более согласованным (для трех типов обмоток). Можно пересмотреть гидравлическую систему согласующих вставок (0,5-1кГс), расположенных под баком высоковольтного объема. Но, в целом, как показано в работе, конструкции элементов и систем установки электронного охлаждения обеспечивают те проектные параметры, которые необходимы для ее сборки и запуска в ОИЯИ и последующего проведения экспериментов NICA.

Выражаю благодарность:

своему научному руководителю Шиянкову Сергею Владимировичу за всестороннюю поддержку, не только в написании данной работы, но и в решении рабочих и организационных вопросов, сопутствующих конструкторским работам;

коллективу лаборатории 5-2, проводившему все физические расчеты магнитной, ускоряющей и вакуумной систем установки, оказывавшему всевозможные консультации автору по вопросам физического функционирования систем электронного охлаждения, а именно: Пархомчуку Василию Васильевичу, Реве Владимиру Борисовичу, Панасюку Виталию

Михайловичу, Бублею Александру Валентиновичу, Брызгунову Максиму Игоревичу и Гостееву Виктору Константиновичу за его эскизы;

Таблица 40 – Параметры системы электронного охлаждения коллайдера NICA

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Диаметр электронного пучка в секции охлаждения, мм	5 ... 20
Энергия электронов, МэВ	до 2,5
Ток электронов (по проекту), А	до 1
Длина секции охлаждения, мм	5882
Длина установочного промежутка коллайдера, мм	9740
Вакуум на участке охлаждения, мбар	10^{-11}
Магнитное поле в секции охлаждения, кГс	2
Ось нижнего пучка над полом, мм	1340
Высота медианной плоскости над полом, мм	1500
Ось верхнего пучка над полом, мм	1660
Длина соленоида верхнего канала ¹ , м	29,7
Длина соленоида нижнего канала ¹ , м	33,3
Рассеиваемая мощность обмоток продольного поля ¹ , кВт	~ 360
Рассеиваемая мощность обмоток коррекции, кВт	~ 18
Суммарный расход охладителя ¹ (воды), л/мин	~ 530
Максимальное давление в гидравлической системе, бар	~ 7,3
Число уникальных сборочных единиц магнитной системы ¹ , шт	28
Число сборочных единиц верхнего уровня ² , шт	39
Максимальное число уровней вложенности сборочных единиц ³	8
Число уникальных подборок ³ , тыс. шт.	1,0
Общее число подборок ³ тыс. шт.	16,1
Число уникальных деталей ³ , тыс. шт.	5,5
Общее число деталей ³ , тыс. шт.	208,1
Число обмоток продольного поля верхнего канала ¹	479
Число обмоток продольного поля нижнего канала ¹	517
Габаритные размеры ⁴ , L x B x H, м	9,7x10,4x8,2
Вес, т	80 ± 10

¹ Указано значение, не учитывающее высоковольтный участок (глава 4).

² Без учета различного вакуумного оборудования и состава высоковольтной части (вакуумная система и высоковольтный объем рассмотрены как целое).

³ Данные САД-статистики ЭМСЕ СЭО.

⁴ L – габаритная длина установки в направлении участка охлаждения по элементам магнитной системы (подставки – негабаритная часть, с учетом подставок, размещенных в помещении высоковольтных баков, максимальная габаритная длина установки составляет 11,0 м), B – габаритная ширина, H – монтажная высота, над уровнем пола.

коллективу экспериментального производства, задействованному в работах по направлению СЭО, Рувинскому Егору Сергеевичу, Бобкову Максиму Николаевичу и Азимбаеву Марату Тулюбековичу за их идеи повышения технологичности конструкций различных частей установки и поиск технологических решений, обеспечивающих возможность изготовления экспериментальных изделий; Волченко Алексею Николаевичу, Судневу Александру Николаевичу, Лахтину Сергею Сергеевичу за внимательное отношение к изготовлению составных частей установки;

коллективу, принимавшему активное участие в проектировании и разработке высоковольтной системы установки и диагностических элементов: Беликову Олегу Витальевичу, Бехтенеvu Евгению Алексеевичу, Горчакову Константину Михайловичу, Гусеву Игорю Анатольевичу, Скоробогатову Дмитрию Николаевичу;

специалистам, участвовавшим в проектировании инженерных сетей установки и вспомогательных систем: Рахимову Альберту Растямовичу, Кремневу Виктору Ивановичу, Гончарову Анатолию Даниловичу, Марченко Наталье Сергеевне, Чиликину Михаилу Владимировичу;

научно-конструкторскому отделу, в лицах: Суханова Андрея Викторовича, как первого моего наставника на пути конструкторской деятельности; конструкторам устройств магнитной, вакуумной, высоковольтной систем установки, а также измерительной системы: Константинову Валерию Михайловичу, Корчагину Владимиру Яковлевичу, Полухину Валерию Александровичу, Посполите Сергею Петровичу, Потапову Сергею Ивановичу, Путьмакову Александру Анатольевичу, Рувинскому Сергею Изотовичу, Ческидову Владимиру Георгиевичу, Эрг Галине Ильиничне; а также Кузьминых Виктору Сергеевичу и Протопопову Александру Юрьевичу за поддержку и консультации;

сотрудникам отдела научно-информационного обеспечения: Кузину Максиму Витальевичу, Максимовской Виктории Владимировне, Костиковой Любви Викторовне, Табатчиковой Валерии Константиновне;

коллективу, непосредственно связанному со вводом СЭО в эксплуатацию в ОИЯИ: Мешкову Игорю Николаевичу, Трубникову Григорию Владимировичу, Бутенко Андрею Валерьевичу, Сыресину Евгению Михайловичу, Сергееву Антону Сергеевичу;

Краснову Александру Анатольевичу за помощь поиска решений в вакуумной системе; Винокурову Николаю Александровичу и Мешкову Олегу Игоревичу за консультации по оформлению, написанию диссертации и её активное чтение;

Логачеву Павлу Владимировичу за активное участие в некоторых дискуссиях по СЭО; Левичеву Евгению Борисовичу и Вострикову Владимиру Александровичу за поддержку в написании диссертации;

и человеку, научившему меня «инженерному языку», моему учителю инженерной графики и начертательной геометрии Алексеевой Эмилии Антоновне.

Список литературы

1. Будкер Г.И. Эффективный метод демпфирования колебаний частиц в протонных и антипротонных накопителях // Атомная энергия. – 1967. – Т. 22, N 5. – С. 346-348.
2. Диканский Н.С., Мешков И.Н., Пархомчук В.В., Скринский А.Н. Развитие методов охлаждения ионов //Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 5. – С. 481-492.
3. Пархомчук В.В., Скринский А.Н. Электронное охлаждение–35 лет развития //Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – №. 5. – С. 473-493.
4. Parkhomchuk V.V., Skrinisky A.N. Electron cooling: physics and prospective applications //Reports on progress in physics. – 1991. – Т. 54. – №. 7. – С. 919. DOI 10.1088/0034-4885/54/7/001
5. Брызгунов М.И., Бублей А.В., Диканский Н.С., Кремнев Н.С., Лебедев В.А., Мешков И.Н., Скринский А.Н., Сухина Б.Н., Пархомчук В.В., Пестриков Д.В., Рева В.Б. Полвека развития электронного охлаждения в Институте ядерной физики СО РАН //Успехи физических наук. – 2025. – Т. 195. – №. 1. – С. 101-111.
6. Будкер Г.И., Куделайнен В.И., Мешков И.Н., Пономаренко В.Г., Попов С.Г., Салимов Р.А., Скринский А.Н., Смирнов Б.М. Электронный пучок для экспериментов по электронному охлаждению // Труды Второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 11–18 ноября 1970 г.: в 2 томах. – Москва: Наука, 1972. – Т. 1. – С. 31-33.
7. Объединенный институт ядерных исследований : [сайт]. – URL: <https://www.jinr.ru> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
8. Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН : [сайт]. – URL: <https://www.inp.nsk.su> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
9. Рева В.Б., Мешков И.Н. СЭО бустера : [презентация : Рабочее совещание в ОИЯИ, г.Дубна, 20 июня 2022]. URL: https://indico.jinr.ru/event/3149/contributions/16636/attachments/12599/21160/4_22Jun20_Reva_ECool_in_Booster.pdf (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
10. Sissakian A., Sorin A., Meshkov I., Kovalenko A. Design and Construction of Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) : Conceptual Design Report / Editors: Meshkov I., Sidorin A. – JINR, Dubna. – 2008. – URL: https://nica.jinr.ru/files/NICA_CDR.pdf (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
11. Nagaitsev S., Prost L., Shemyakin A. Fermilab 4.3 MeV electron cooler //Journal of Instrumentation. – 2015. – Vol. 10. – №. 01 – p. T01001. DOI: 10.1088/1748-0221/10/01/T01001 URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.6994> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.

12. Fedotov A.V., Fischer W., Gu X., Kayran D., Kewisch J., Minty M., Schoefer V., Seletskiy S., Zhao H. Electron cooling of colliding ion beams in RHIC: status and perspectives //Proceedings of COOL2021. – 2021. – p. 42-47. DOI: 10.18429/JACoW-COOL2021-S601 URL: <https://inspirehep.net/files/f95b47a4d8e68a8f9c5a708a154db843> (дата обращения: 30.04.2025) – Текст : электронный.
13. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей: Учеб.пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 528 с.
14. Брызгунов М.И., Камерджиев В.С., Пархомчук В.В., Рева В.Б Особенности динамики охлаждения на высоковольтной установке электронного охлаждения в COSY //Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 8. – С. 124-131.
15. Пономарев А. Автоматематика: из скольких деталей состоит ваша машина : [сайт]. – URL: <https://www.techinsider.ru/vehicles/658323-iz-skolkih-detaley-sostoit-avtomobil> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
16. Библиотека культурного центра «Автоград» ВАЗ-2101. Первый автомобиль. История производства : [сайт]. – URL: <https://vazbook.libavtograd.ru/mi-cat-vazmodels/item/19-mat-vaz2101> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
17. Гусева Р.И. Особенности технологии сборки планера самолета: учеб. пособие //Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ». – 2013. – 133 с.
18. ЗАО "КОМЕТА" : [сайт]. – URL: <https://zaokometa.ru> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
19. Solid Edge : [сайт]. – URL: <https://solidedge.siemens.com> (дата обращения: 30.12.2021) – Текст : электронный.
20. Мешков И.Н., Трубников Г.В. Технический проект ускорительного комплекса NICA /под ред. И.Н. Мешкова, Г.В. Трубникова. – Дубна : ОИЯИ. – 2015. – Т. 3 – 141 с.
21. HIWIN Technologies Corp. : [сайт]. – URL: <https://www.hiwin.tw> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
22. ГОСТ 25348-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Ряды допусков, основных отклонений и поля допусков для размеров свыше 3150 мм: межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21.07.82 N 2765-ст : дата введения 1983-07-01. – Москва : Стандартиформ. – 2004. – 21 с.
23. Кремнев Н.С., Брызгунов М.И., Бублей А.В., Константинов В.М., Корчагин В.Я., Рева В.Б., Рувинский С.И., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Посполита С.П., Путьмаков А.А., Шиянков С.В. Конструкция магнитной системы высоковольтного электронного охлаждения коллайдера– Текст: электронный // Письма в ЭЧАЯ. – 2024. Т. 21, № 3 (254). – С. 352-361.

24. Parkhomchuk V.V., Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Denisov A.P., Goncharov A.D., Kremnev N.S., Panasyuk V.M., Putmakov A.A., Reva V.B., Skorobogatov D.N. Status of the 2.5 MeV Electron Cooling System for NICA Collider //Proceedings of Russian Particle Accelerator Conference RuPAC 2018. – 2018. – p. 35-38.
25. Bocharov V.N., Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Cheskidov V.G., Fedotov M.G., Parkhomchuk V.V., Reva V.B. System for measurement of magnetic field line straightness in solenoid of electron cooler for COSY //Proceedings of COOL'11. – 2011. – Vol. 11. – p. 107-110.
26. Кремнев Н.С., Брызгунов М.И., Бублей А.В., Пархомчук В.В., Панасюк В.М., Рева В.Б., Путьмаков А.А., Посполита С.П., Шиянков С.В. Конструкция центрального соленоида высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA //Письма в ЭЧАЯ. – 2020. – Т. 17. – №. 4(229). – С. 411-416.
27. 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., Панасюк В.М., Путьмаков А.А., Бублей А.В., Брызгунов М.И., Шиянков С.В. ; заявитель ИЯФ СО РАН. – 11 с. : ил.
28. Bryzgunov M., Bublely A., Gosteev V., Panasyuk V., Parkhomchuk V., Reva V. Magnetic system of electron cooler for COSY //Proceedings of COOL'11. – 2011. – p. 114-117.
29. Сухина Б.Н. Физико-технические аспекты создания установок электронного охлаждения : дис. на соиск. учен. степени доктора технических наук – Ин-т ядер. физики им. Г.И. Будкера СО РАН – Новосиирск, 2000.
30. Арапов Л.Н., Диканский Н.С., Кокоулин В.И., Куделайнен В.И., Лебедев В.А., Пархомчук В.В., Смирнов Б.М., Сухина Б.Н. Прецизионный соленоид для электронного охлаждения// XIII Межд. конф. по ускорителям частиц высоких энергий, Новосибирск. – 1986. – Т. 1. – С. 341-343.
31. Tanabe T., Ohtomo K., Katayama T., Syresin E., Watanabe I., Yamashita A. Design study of the ACR electron-cooler for RIBF //Proceedings of EPAC 2000. – 2000. – p. 2459-2461. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e00/PAPERS/THP5A12.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
32. Tranquille G., Joergensen L.V., Luckin D., Warner R. The CERN-ELENA electron cooler magnetic system //9th International Particle Accelerator Conference IPAC2018. – 2018– p. 842-845. DOI:10.18429/JACoW-IPAC2018-TUPAF056. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/TUPAF056.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
33. Maury S., Bartmann W., Belochitskii P., Breuker H., Butin F., Carli C., Eriksson T., Pasinelli S., Tranquille G. ELENA: the extra low energy anti-proton facility at CERN // Hyperfine Interactions.

- 2014. – Т. 229. – p.105-115. DOI: 10.1007/s10751-014-1067-y URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10751-014-1067-y.pdf> (дата обращения: 30.04.2025) – Текст : электронный.
34. Fadil H., Fujimoto S., Noda A., Shirai T., Souda H., Tongu H., Fujimoto T., Iwata S., Shibuya S., Seleznev I.A., Syresin E., Grieser M., Noda K. Design and commissioning of a compact electroncooler for the S-LSR //Proceedings of EPAC 2006. – 2006 – p.1639-1641. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e06/PAPERS/TUPLS064.PDF> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
35. Steck M., Blasche K., Eickhoff H., Franczak B., Franzke B., Groening L., Winkler T., Dolgashev V.A., Parkhomchuk V.V. Commissioning of the electron cooling device in the heavy ion synchrotron SIS // Proceedings of EPAC 98. – 1998 – p.550-552. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e98/papers/WEP05A.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
36. Blasche K., Bijhne D., Franzke B., Prange H. The SIS heavy ion synchrotron project //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1985. – Т. 32. – №. 5. – p.2657. URL: https://accelconf.web.cern.ch/p85/PDF/PAC1985_2657.pdf (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
37. Bocharov V., Bubleу A., Boimelstein Yu., Veremeenko V., Voskoboinikov V., Goncharov A., Grishanov V., Dranichnikov A., Evtushenko Yu., Zapiatkin N., Zakhvatkin M., Ivanov A., Kokoulin V., Kolmogorov V., Kondaurov M., Konstantinov E., Konstantinov S., Krainov G., Kriuchkov A., Kuper E., Xia G.X. HIRFL-CSR electron cooler commissioning //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – Т. 532. – №. 1-2. – p. 144-149. URL: <https://dacemirror.sci-hub.se/journal-article/f0c506b44dec398e3d96d8073960e8db/bocharov2004.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
38. Behtenev E., Bocharov V., Bubleу V., Vedenev M., Voskoboinikov R., Goncharov A., Evtushenko Yu., Zapiatkin N., Zakhvatkin M., Ivanov A., Kokoulin V., Kolmogorov V., Kondaurov M., Konstantinov S., Krainov G., Kozak V., Kruchkov A., Kuper E., Medvedko A., Mironenko L., Panasiuk V., Parkhomchuk V., Reva V., Skrinky A., Smirnov B., Skarbo B., Sukhina B., Shrainer K., Yang X.D., Zhao H.W., Li J., Lu W., Mao L.J., Wang Z.X., Yan H.B., Zhang W, Zhang J.H. Commission of electron cooler EC-300 for HIRFL-CSR //Proceedings of EPAC 2004. – 2004 – p. 1419-1421. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e04/PAPERS/TUPLT120.PDF> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.

39. Yang X.D., Mao L.J., Li J., Ma X.M., Yan T.L., Li G.H., Tang M.T. Commissioning of electron cooling devices at HIRFL-CSR // Proceedings of RuPAC 2016. – 2016 – p. 458-460. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/papers/wepsb042.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
40. Bocharov V.N., Bublei A.V., Konstantinov S.G., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V. Precision measurements and compensation for the transverse components of the solenoids magnetic field // Instruments and Experimental Techniques. – 2005. – Vol.48 (6) – p. 772-779. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10786-005-0139-2.pdf> (дата обращения: 30.04.2025) – Текст : электронный.
41. Panasyuk V., Bryzgunov M., Bublei A., Parkhomchuk V., Reva V., Konstantinov V., Korchagin V., Kremnev N., Pospolita S., Ruvinskii S. The magnetic system of electron coolers of collider NICA // Proceedings of COOL2019. –2019. – p. 112-115. DOI: 10.18429/JACoW-COOL2019-TUPS15
42. LUVATA : [сайт]. – URL: <https://www.luvata.com> (дата обращения: 29.04.2025).
43. СТО.103-2011. Стандарт организации. Пропитка и заливка электротехнических изделий эпоксидными компаундами : Утв. приказом по Институту Ядерной Физики СО РАН от 18.05.2011 года №112. – Новосибирск : ИЯФ СО РАН. – 2011. – 50 с.
44. ГОСТ 25346-2013. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2014 г. № 28-ст : дата введения 2015-07-01. – Москва : Стандартиформ. – 2019. – 45 с.
45. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2/ Под ред. А.Г.Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение. – 1985. – 496 с., ил.
46. Грановский Г.И., Грудов П.П., Кривоухов В.А., Ларин М.Н., Малкин И.П. Резание металлов. – М. : Машгиз. – 1954. – 472с., ил.
47. СТО.104-2010. Стандарт организации. Конструирование обмоток многополюсных магнитов : Утв. приказом по Институту Ядерной Физики СО РАН от 2.06.2010 года – Новосибирск : ИЯФ СО РАН. – 2010. – 32 с.
48. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям /Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. –1992. – 672 с.: ил.
49. Kremnev N.S., Bryzgunov M.I., Bublei A.V., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Putmakov A.A., Reva V.B., Shiyankov S.V. Adjusting Unit of Longitudinal Field Coils for NICA

- HV Electron Cooler's Solenoid // Proceedings of COOL2019. –2019. – p.127-128. DOI: 10.18429/JACoW-COOL2019-TUPS21
50. RUD : [сайт]. – URL: <https://www.rud.com> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 51. Таблицы и альбом по допускам и посадкам: Справочное пособие / А.Б.Романов, В.Н. Федоров, А.И. Кузнецов. – СПб. : Политехника. – 2005. – 88 с.: ил.
 52. Тьялве Э. Краткий курс промышленного дизайна / Пер. с англ. П.А. Кунина. – М. : Машиностроение. – 1984. – 192 с., ил.
 53. WAGO : [сайт]. – URL: <https://www.wago.com> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 54. Nagaitsev S., Burov A., Crawford A.C., Kroc T., MacLachlan J., Schmidt C.W., Shemyakin A., Warner A. Status of the FERMILAB electron cooling project //Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. – IEEE, 1999. – Vol. 1 – p.521-523. URL: <https://cds.cern.ch/record/553115/files/thdl3.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 55. Leibfritz J., Carlson K., Crawford A.C., Makarov A., McGee M., Nagaitsev S., Saewert G., Saffrahn F., Shemyakin A., Warner A. FERMILAB electron cooling project: engineering aspects of cooling section //Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. – IEEE, 2001. – Vol. 2 – p. 1414-116. URL: <https://cds.cern.ch/record/555983/files/tpah088.pdf> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 56. Crawford A.C., Nagaitsev S., Shemyakin A., Seletsky S., Tupikov V. Field measurements in the FERMILAB electron cooling solenoid prototype //Fermi National Accelerator Lab. (FNAL), Batavia, IL (United States), 2003. – №. FERMILAB-TM-2224. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc740337/m2/1/high_res_d/815973.pdf (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 57. THK Company, LTD. : [сайт]. – URL: <https://www.thk.com> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 58. АО «ДКС» : [сайт]. – URL: <https://www.dkc.ru> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
 59. Reva V.B., Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Goncharov A.D., Kremnev N.S., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Polukhin V.A., Putmakov A.A. High voltage cooler NICA status and ideas //Proceedings of COOL2017. – 2017. – p. 25-27. DOI: 10.18429/JACoW-COOL2017-TUM21
 60. Персов Б.З. Расчет и проектирование экспериментальных установок – Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика"; Институт компьютерных исследований. – 2006. – 348 с.

61. Steck M., Blasche K., Bourgeois W., Franzke B., Groening L., Dikansky N.S., Kudelainen V.I., Parkhomchuk V.V., Sharapa A.I., Shemyakin A.V., Smirnov B.M. Fast beam accumulation by electron cooling in the heavy ion synchrotron SIS// Proceedings of EPAC96. – 1996. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e96/PAPERS/THPL/THP031L.PDF> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный
62. Bryzgunov M., Parkhomchuk V., Reva V., Bublely A., Denisov A., Panasyuk V., Goncharov A., Putmakov A., Kremnev N., Polukhin V., Chekavinskiy V., Gusev I., Senkov D., Karpov G., Bekhtenev E., Kondaurov M., Zharikov A., Kobets A., Meshkov I., Melnikov S., Orlov O., Sergeev A. Status of the electron cooler for NICA booster and results of its commissioning // Proceedings of COOL2019. – 2019. – p. 22-25. DOI: 10.18429/JACoW-COOL2019-TUX01
63. Bryzgunov M., Bublely A., Panasyuk V., Parkhomchuk V., Polukhin V., Reva V. Low energy cooler for NICA Booster // Proceedings of RuPAC 2012. – 2012. – p. 391-393.
64. Reva V.B., Alinovskiy N.I., Bedareva T.V., Bekhtenev E.A., Belikov O.V., Bocharov V.N., Borodich V.V., Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Chekavinskiy V., Cheskidov V., Dovzhenko B., Erokhin A., Fedotov M., Goncharov A.D., Gorchakov K., Gosteev V.K., Gusev I., Ivanov A., Karpov G., Koisin Yu., Kondaurov M., Kozak V., Kruchkov A., Lisitsyn A., Lopatkin I., Mamkin V., Medvedko A.S., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Poletaev I., Polukhin V., Protopopov A., Pureskin D., Putmakov A., Selivanov P.A., Semenov E., Senkov D., Skorobogatov D.N., Zapiatkin N.P. Commissioning COSY cooler with electron beam at Novosibirsk // Proceedings of COOL'13. – 2013. – p. 79-83.
65. Bryzgunov M.I., Panasyuk V.M., Reva V.B. Calculations of electron beam motion in electron cooling system for COSY // Proceedings of COOL'09. – 2009. – p. 134-137.
66. Bublely A., Goncharov A., Ivanov A., Konstantinov E., Konstantinov S., Kryuchkov A., Panasyuk V., Parkhomchuk V., Reva V., Skarbo B., Smirnov B., Sukhina B., Tiunov M., Zakhvatkin M., Yang X. The electron gun with variable beam profile for optimization of electron cooling // Proceedings of EPAC2002. – 2002. – p. 1356-1358.
67. Bryzgunov M., Bublely A., Ivanov A., Parkhomchuk V., Reva V., Kruchkov A. Electron gun with variable beam profile for COSY cooler // Proceedings of COOL'11. – 2011. – p. 99-102.
68. Ivanov A.V., Parkhomchuk V.V., Sukhina B.N., Tiunov M.A. The hollow electron beam. The new opportunities in electron cooling // 225th International WE-Heraeus Seminar on Beam Cooling and Related Topics (ECool2001). – 2001. – Vol. 255.
69. Bublely A., Reva V., Parkhomchuk V. New generation of the electron cooling systems // Proceedings of APAC 2004. – 2004. – p. 100-102.

70. Брызгунов М.И., Гончаров А.Д., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Рева В.Б., Скоробогатов Д.Н. Передача мощности в установке высоковольтного электронного охлаждения для синхротрона COSY //Приборы и техника эксперимента. – 2015. – №. 2. – С. 14-23.
71. Митин А.В., Тарасов В.А., Доронин В.Н., Назипов Р.А. Магнитные наноструктурированные полимерные композиты //Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53. – №. 12. – С. 2336-2339. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/1653> (дата обращения: 30.04.2025) – Текст : электронный
72. Брызгунов М.И., Бублей А.В., Денисов А.П., Гончаров А.Д., Пархомчук В.В., Панасюк В.М., Рева В.Б., Кремнев Н.С., Путьмаков А.А., Беликов О.В., Горчаков К.М., Скоробогатов Д.Н., Чекавинский В.А., Бехтенов Е.А., Жариков А.А., Карпов Г.В., Кондауров М.Н., Гусев И.А., Сеньков Д.В. Разработка высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. – 2020. – Т. 17. – №. 4(229). – С. 391-396.
73. Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Chekavinskiy V.A., Gusev I.A., Ivanov A.V., Kondaurov M.N., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Pureskin D.N., Putmakov A.A., Reva V.B., Senkov D.V., Skorobogatov D.N. High Efficiency Electron Collector for the High Voltage Electron Cooling System of COSY //Proceedings of COOL'15.– 2015. – p. 112-115.
74. Мешков И.Н., Салимов Р.А., Файнштейн В.Г. Многократная рекуперация энергии электронов //Журнал технической физики. – 1973. – Т. 13. – С. 1782-1784.
75. Рева В.Б., Брызгунов М.И. Особенности продольной электронной силы трения в экспериментах на синхротроне COSY //Письма в ЭЧАЯ. – 2024. – Т. 21. – №. 3(254). – С. 362-374.
76. Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / Под ред. чл.-корр. РАН Н.С. Диканского. – Новосибирск: Параллель. – 2009. – Т. 294.
77. Камкабель. Номенклатурный каталог 2024 //ООО «Камский кабель». – 2024. – 184 с. URL: <https://kamkabel.ru/upload/iblock/74f/a0p18s26gbqw4x4rtvicbewcmq05pw51.pdf> (дата обращения: 30.04.2025) – Текст : электронный
78. ГОСТ 19746-2015. Проволока из припоев серебряных. Технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 июня 2016 г. № 583-ст : дата введения 2017-01-01. – Москва : Стандартинформ. – 2016. – 12 с. – Текст : непосредственный.
79. Розанов Л.Н. Вакуумная техника : учебник для вузов / Л.Н. Розанов. – 3-е издание, перераб. и доп. – М. : Высшая школа. – 2007. – 391 с.

80. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем /А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Е.А. Пенчко – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия. – 1979. – 504 с., ил.
81. Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions : [сайт]. – URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
82. SAES Getters S.p.A. : [сайт]. – URL: <https://www.saesgetters.com> (дата обращения: 29.04.2025) – Текст : электронный.
83. Куренной С.С. Взаимодействие пучка с вакуумной камерой ускорителя. Методы вычисления импеданса связи //Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1993. – Т. 24. – №. 3. – С. 878-927. URL: http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1993-v24/v-24-3/pdf_obzory/v24p3_5.pdf (дата обращения: 30.04.2025) – Текст : электронный
84. ГОСТ 22388-90. Сильфоны однослойные диаметром до 200 мм. Общие технические условия : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : срок действия с 1992-01-01 до 1997.01.01. – Москва : Издательство стандартов. – 1994. – 44 с.

Приложение А

(справочное)

Порядок сборки магнитной системы установки

Сборка магнитной системы установки на месте эксплуатации, предусмотренная конструкцией ее элементов, может быть выполнена как в последовательности «от соленоида охлаждения», так и в последовательности «от высоковольтных баков». Сборку СЭО возможно производить по частям: 1) часть «В» – размещение элементов в помещении высоковольтных баков (ускорителей-рекуператоров) с установкой транспортных соленоидов в проемах стены радиационной защиты без установки вставок транспортного канала, примыкающих к тороидам; 2) часть «С» – размещение элементов, сопряженных с участком коллайдера (тороид – согласующие секции 1-2 кГц – соленоид охлаждения – согласующие секции 1-2 кГц – тороид);

Процесс монтажа, главным образом, заключается в сборке вакуумных соединений, установке элементов магнитной системы в рабочие положения (что зачастую связано с необходимостью осуществления контроля положения при помощи лазерного трекинга) и подключения устройств к необходимым инженерным системам. Позиционирование основных устройств магнитной системы осуществляется за счет их выставки на индивидуальных подставках при помощи опор с винтовыми подвижками. Замыкающие элементы монтируются в предусмотренных промежутках, находящихся между окончательно отъюстированными основными частями магнитной системы. Последовательность сборки замыкающих элементов подробно описана в соответствующих главах диссертации.

Для сокращения срока сборочных работ перед началом монтажа элементов СЭО следует произвести предварительную разметку полов помещений, отразив расположение опорных площадок в соответствии с рисунком А.1 (координаты расположения площадок могут быть подготовлены по координатам геодезических меток ЭМСЕ СЭО NICA в виде электронной таблицы).

Необходимым условием правильной организации процесса сборки СЭО с началом из помещения ускорителей (сборки части «В») является обеспечение возможности последующего свободного доступа для установки соединительных вставок INSERT2 (up)/INSERT3 (down), INSERT3 (up)/INSERT2 (down) (рисунок 54) находящихся между тороидами TOR90 и секциями прямолинейного соленоида LINE2.

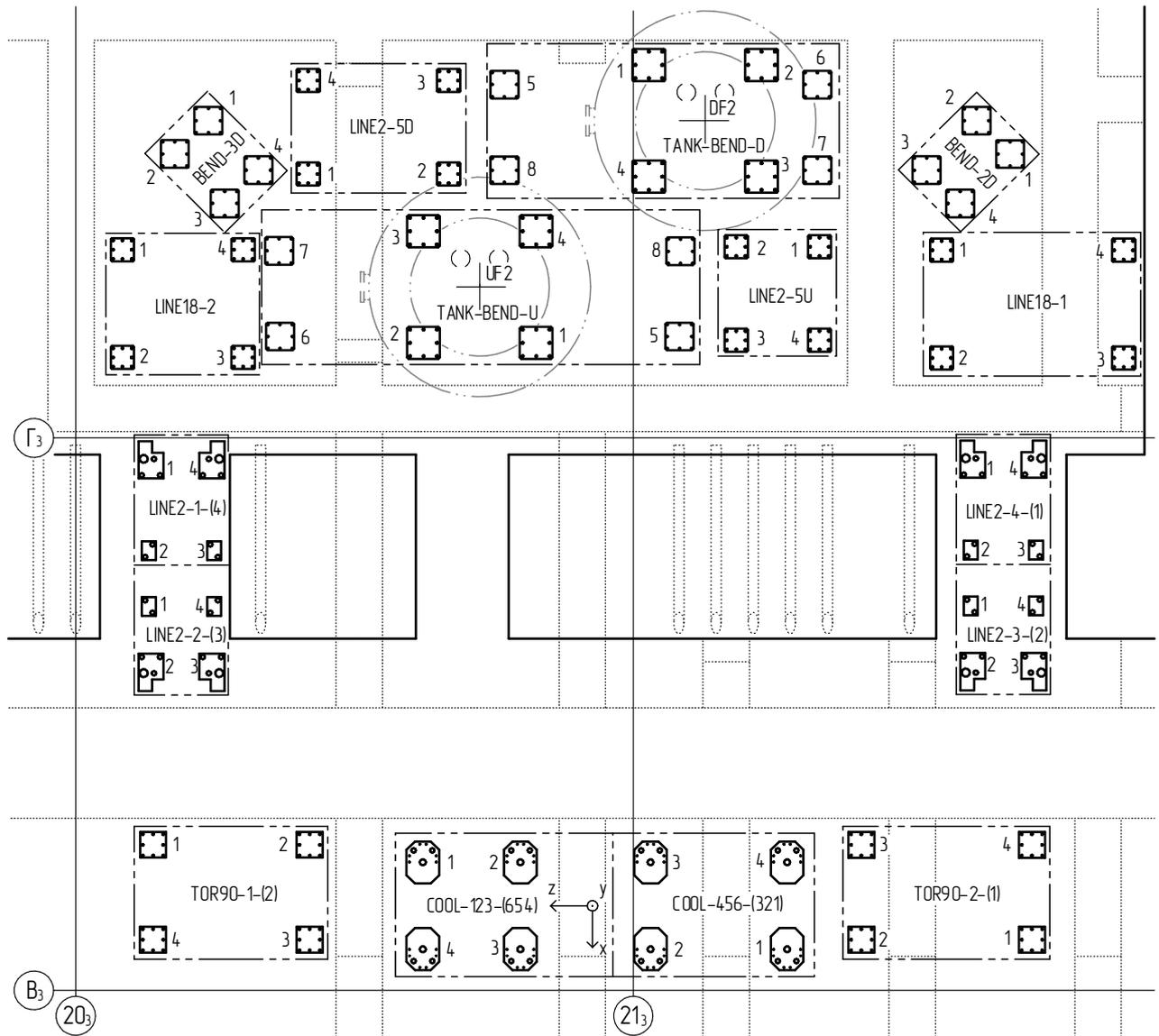


Рисунок А.1 – Расположение опорных площадок установки:
пунктиром показаны каналы выполненные в полу здания

Порядок сборки части «В».

Размещение элементов в помещении высоковольтных баков следует производить таким образом, чтобы обеспечить беспрепятственный доступ для подвижных (переносных) такелажных приспособлений к участкам монтажа секций LINE2¹ транспортных каналов, находящихся в мертвой зоне крана. НЕ ДОПУСКАЕТСЯ установка поворотных соленоидов BEND-2 (down), BEND-3 (down), соленоидов LINE18-1 (down), LINE18-2 (down), изображенных на рисунке А.2 и принадлежащих им подставок (или других сопрягаемых частей), до установки секций транспортного канала LINE2.

¹ LINE2-2 (up)/LINE2-3 (down), LINE2-1 (up)/LINE2-4 (down), LINE2-3 (up)/LINE2-2 (down), LINE2-4 (up)/LINE2-1 (down) рисунок А.2.

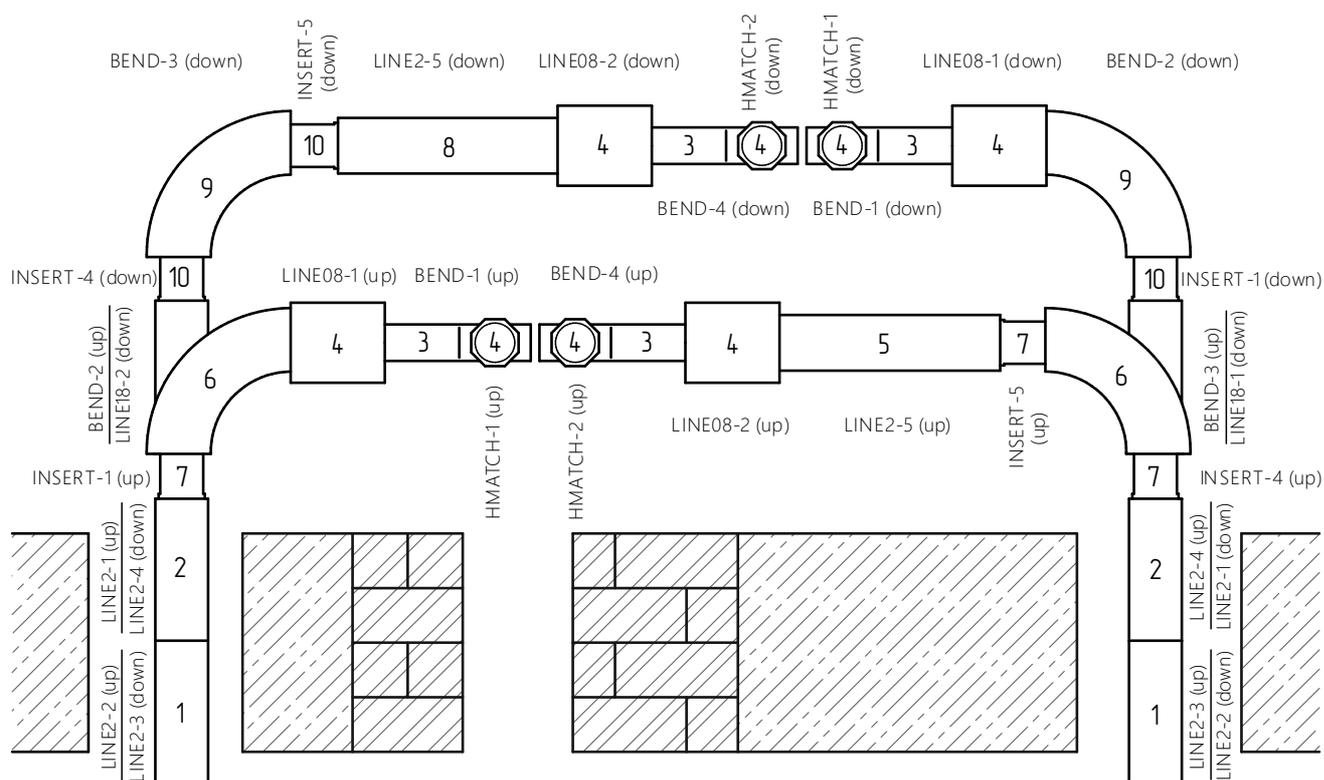


Рисунок А.2 – Порядок установки элементов части «В»

1.1) Для обеспечения возможности установки секций LINE2 внутри проемов стены радиационной защиты¹, необходимо осуществить монтаж гирдеров и произвести проверку работы подвижных частей гирдеров, перемещение которых должно выполняться без посторонних звуков, ударов и заеданий. Гирдеры должны быть установлены в проектное положение с точностью не хуже половины диапазона юстировки секций LINE2.

1.2) Секции LINE2 устанавливаются на индивидуальные (подвижные) подставки гирдера из помещения высоковольтных баков и при помощи винтового толкателя задвигаются внутрь проема стены радиационной защиты. Контроль за установкой секций в проектное положение выполняется с при помощи лазерного трекинга.

2) Внутри секций соленоидов (пп.1.2) устанавливаются прямолинейные вакуумные камеры транспортного участка. Заглушки с камер не снимаются.

3.1) До выполнения установки гирдеров транспортного канала (пп.1.1) допускается производить монтаж только элементов размещенных на конструкциях опор высоковольтных баков. Процесс сборки следует организовывать таким образом, чтобы обеспечить необходимое свободное пространство для проведения работ по монтажу гирдеров и элементов прямолинейного участка транспортной системы внутри проемов радиационной защиты помещения.

¹ Установка производится из помещения высоковольтных баков, изображенного на рисунке А.1 выше оси Г₃ здания в сторону от тоннеля ускорителя (стена радиационной защиты расположена между осями В₃ и Г₃ здания ускорительного комплекса).

3.2) Монтаж элементов транспортной системы следует начинать с установки поворотных соленоидов BEND-1 (up), BEND-4 (up), BEND-4 (down), BEND-1 (down) (рисунок А.2) на уже установленных опорных конструкциях высоковольтных баков. Контроль за установкой элементов в проектное положение выполняется с при помощи лазерного трекинга.

3.3) После установки поворотных соленоидов на опоры высоковольтных баков устанавливаются вставки транспортного канала LINE08¹, внутри которых при частичной разборке вставок LINE 08, выполняются соединения вакуумной системы. Контроль за установкой элементов в проектное положение выполняется с при помощи лазерного трекинга. **ВНИМАНИЕ:** для заключительной сборки вакуумных камер СЭО может потребоваться частичная разборка вставок LINE08, необходимая для обеспечения доступа к сильфонным узлам вставок, рекомендуется окончательную сборку корпусов LINE08 выполнять после сборки вакуумной части СЭО.

3.4) Согласующие секции НМАТЧН² устанавливаются при их полной разборке после установки нижнего (опорного) фланца высоковольтного объема с принадлежащими ему вакуумными и гидравлическими элементами. Обмотки согласующих секций заводятся через зазор, образованный разомкнутыми фланцами вакуумных камер. После того как все обмотки надеты поверх вакуумной камеры, производится монтаж вакуумного (фланцевого) соединения и последующая расстановка обмоток в проектное положение при помощи дистанционных проставок. После того как все обмотки установлены в проектном положении, в зазоре между торцевым фланцем поворотного соленоида и фланцем высоковольтного бака выполняется сборка корпуса устройства. После сборки корпуса производят сборку электрических и гидравлических соединений вставок НМАТЧН.

При последовательной сборке транспортной части после монтажа прямолинейных участков (пп.1.2-2) и сборки элементов размещенных на опорах высоковольтных баков (пп.3.1-3.4), следует приступить к установке прямолинейных соленоидов LINE 2-5 (up)³.

4.1) Производится установка опоры прямолинейного соленоида LINE2-5U (рисунок А.1).

4.2) Производится установка соленоида LINE2-5 (up) (рисунок А.2) с предварительно установленной вакуумной камерой.

4.3) Производится установка соленоида LINE2-5 (up) в проектное положение. Контроль за установкой выполняется с при помощи лазерного трекинга.

¹ LINE08-1 (up), LINE08-2 (up), LINE08-2 (down), LINE08-1 (down) рисунок А.2.

² НМАТЧН-1 (up), НМАТЧН -2 (up), НМАТЧН -2 (down), НМАТЧН -1 (down) рисунок А.2.

³ Технически установка соленоидов LINE2-5 (верхнего и нижнего каналов) может быть выполнена после установки ближайших к ним поворотных соленоидов BEND, но этот процесс гораздо более трудоемок по причине того, что вакуумная камера соленоидов LINE2-5 имеет большую длину чем корпус соленоида (на длину вставки INSERT), что будет требовать выполнения ее перемещений при установке соленоида на его опору.

4.4) Производится установка шибера и сильфонного узла вакуумной части вставки LINE 08-2 (up) и сборка корпуса вставки. Производится установка вставки в проектное положение. Контроль за установкой выполняется с при помощи лазерного трекинга.

5.1) После монтажа прямолинейного соленоида LINE 2-5 (up) ¹ производится установка опор LINE18-1 и LINE18-2 (рисунок А.1).

5.2) До установки соленоидов LINE18-1 (down) и LINE18-2(down) (рисунок А.2) выполняются соединения фланцев вакуумной камеры соленоидов LINE2 *нижнего канала* с вакуумной камерой соленоидов LINE18 *нижнего канала*. Собранные соединения уводятся внутрь секций LINE2 на всю длину камеры вставки LINE18 ².

5.3) До установки соленоидов BEND-2 (UP) и BEND-3 (UP) производится соединение фланцев вакуумных камер, вставок INSERT-1 (up) и INSERT-4 (up) *верхнего канала* со стороны прямолинейного участка. Собранные соединения уводятся внутрь секций прямолинейных соленоидов транспортного канала. Извлечение камер верхнего канала НЕ ДОПУСКАЕТСЯ, установка со стороны поворотных соленоидов BEND (после их монтажа) – невозможна.

5.4) На опоры устанавливаются элементы магнитной системы BEND-2 (UP)/LINE18-2 (down), BEND-3 (UP)/LINE18-1 (down), собранные на общем подрамнике. Контроль за установкой элементов в проектное положение выполняется с при помощи лазерного трекинга.

5.5) Вставки транспортного канала INSERT-1 (up), INSERT-4 (up) и INSERT-5(up) монтируются в несколько этапов. Первоначально производится установка шарнирных направляющих; обмотки ведущего поля устанавливаются на направляющие без фиксации и сдвигаются в сторону прямолинейного участка транспортной системы. При установке направляющих их положение следует проверять при помощи лазерного трекинга либо других методов измерений, позволяющих осуществить контроль горизонтального положения направляющих и их взаимной параллельности при перпендикулярном положения относительно фланца сопрягаемого поворотного соленоида BEND.

5.6) Производится сборка соединения фланцев вакуумных камер вставок INSERT-1 (up), INSERT-4 (up) и поворота BEND.

5.7) Производится сборка соединения фланцев вакуумных камер соленоида LINE2-5 (up) и поворота BEND.

5.8) Производится сборка соединения фланцев вакуумных камер вставки LINE08-1 (up) и поворота BEND-2 (up) (может потребоваться частичная разборка вставки и последующая проверка ее положения при помощи лазерного трекинга).

¹ Монтаж прямолинейного соленоида LINE 2-5 (down) производится в той же последовательности, что и соленоида LINE 2-5 (up), установку соленоида (LINE 2-5 (down)) рекомендуется производить после монтажа верхнего канала магнитной системы СЭО.

² Допускается извлечение вакуумной камеры всего промежутка (нижнего канала) с последующей ее установкой со стороны соленоида LINE18 при обеспечении необходимого свободного пространства (не менее 4 м) перед соленоидом LINE18.

5.9) Производится продольная расстановка обмоток и их крепление к направляющим, сборка корпуса вставки и последующая сборка электрических и гидравлических соединений вставок INSERT-1 (up), INSERT-4 (up) и INSERT-5(up), в том числе вывод соединений датчиков положения пучка и цепей прогрева вакуумной камеры.

5.10) Производится соединение фланцев вакуумных камер вставок INSERT-4 (down) и INSERT-1 (down) со стороны прямолинейного участка. Собранное соединение уводится внутрь прямолинейных секций транспортного канала. Извлечение камер НЕ ДОПУСКАЕТСЯ, установка со стороны поворотных соленоидов BEND (после их монтажа) – невозможна.

6) Производится монтаж соленоида LINE2-5 (down) (рисунок А.2) в последовательности пп.4.1-4.4. Если соленоид был установлен ранее, то переходят к п.7.1.

7.1) Производится установка опор поворотов BEND-3D и BEND-2D (рисунок А.1).

7.2) Производится установка соленоидов BEND-3 (down) и BEND-2 (down) (рисунок А.2). Контроль за установкой выполняется с при помощи лазерного трекинга.

7.3) Производится установка направляющих вставок транспортного канала INSERT-1 (down), INSERT-4 (down) и INSERT-5 (down) в последовательности пп.5.5-5.8.

8) После окончательной сборки элементов транспортной части магнитной системы СЭО, сборки высоковольтного оборудования и монтажа радиационной защиты помещений СЭО требуется проверка положения элементов при помощи лазерного трекинга и корректировка выставки элементов при необходимости.

9) Вакуумное оборудование в помещении высоковольтных баков устанавливается в соответствии с планом монтажа вакуумной системы СЭО.

Порядок сборки части «С».

1) В тоннеле коллайдера последовательно, в соответствии с координатами их расположения по ЭМСЕ СЭО НИКА, устанавливаются: подставка тороида TOR90-1-(2), опоры и составные частей гирдера COOL-123-(654) и COOL-456-(321), подставка тороида TOR90-2-(1), обозначенные на рисунке А.1. При сборке половинок гирдера необходимо произвести измерения и возможной корректировки величин параллельности, прямолинейности и плоскостности линейных направляющих до значений, необходимых для обеспечения перемещения подвижных подставок секций соленоида.

2.1) На гирдер помещаются подвижные подставки секций и секции соленоида охлаждения COOL (рисунок А.3). Выполняется предварительная установка секций соленоида в проектное положение. Контроль за установкой выполняется с при помощи лазерного трекинга. Производится сборка корпусов секций в единую конструкцию соленоида охлаждения.

2.2) При необходимости организации магнитных измерений соленоида и согласующих секций MATCH¹ их крепят к крайним секциям соленоида COOL (с одной стороны) и

¹ MATCH-1 (up)/MATCH-2 (down) и MATCH-2 (up)/MATCH-1 (down) рисунок А.3.

устанавливают временную немагнитную распорку между корпусом согласующей секции и гирдером (с другой стороны).

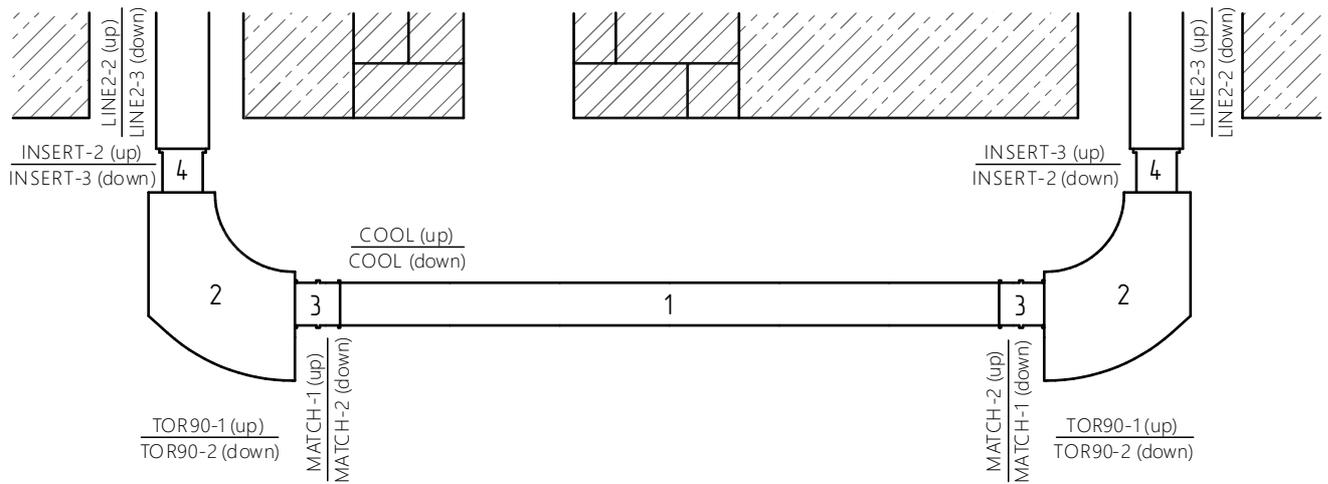


Рисунок А.3 – Порядок установки элементов части «С»

3) После установки секций соленоида COOL (рисунок А.3) приступают к этапу его магнитных измерений и юстирования обмоток с целью получения необходимой однородности магнитного поля. Данный этап требует наличия инженерных сетей электрического питания и гидравлического охлаждения соленоида (могут быть использованы временные подключения при обеспечении необходимых параметров подключений).

После окончания магнитных измерений и демонтажа измерительного оборудования, электрических и гидравлических соединений соленоида возобновляется процесс монтажа элементов СЭО в помещении тоннеля коллайдера NICA.

4.1) Производится демонтаж соединения корпусов секций соленоида COOL (рисунок А.3) в месте его деления на две равных части (по 3 секции).

4.2) Если для магнитных измерений устанавливались согласующие секции (пп.2.2), их снимают.

4.3) Внутри каждой из половин соленоида устанавливаются вакуумные камеры верхнего и нижнего каналов. Для организации наибольшего свободного пространства в плоскости разъема половин соленоида, части сдвигают в крайние положения гирдера, что добавляет 210 мм к плоскости разъема.

4.4) Возможно производить установку вакуумных камер с одной стороны последовательно проходя одну из половин гирдера (внутри соленоидов). ВНИМАНИЕ: для установки вакуумных камер участка охлаждения необходимо обеспечить свободное пространство (не менее 3 м) перед гирдером соленоида охлаждения.

4.5) В зазоре, образованном после раздвижки половин соленоида, выполняется соединение фланцев вакуумных камер, после чего половины соленоида выставляются в рабочее

положение и соединяются в месте разъема. Производится проверка их положения лазерным трекингом. На гирдер выставляются упоры – соленоид фиксируется от продольных перемещений по рельсам.

5.1) На подставки TOR-1-(2) TOR-2-(1) (рисунок А.1) устанавливаются тороиды TOR90^{1,2}, заранее собранные с вакуумными камерами и дипольными корректорами ионного пучка. Выполняется установка элементов в проектное положение. Контроль за установкой выполняется с помощью лазерного трекинга.

5.2) Выполняется соединение вакуумных камер тороидов с шиберами вакуумной системы коллайдера NICA.

6.1) К крайним секциям соленоида крепятся половинки корпусов согласующих секций MATCH, в зазор, образованный между вакуумными камерами тороида и соленоида, заводятся основные обмотки согласующей секции и временно закрепляются на установленной половинке корпуса.

6.2) В зазор (между обмотками и тороидом) устанавливаются сильфонные узлы секций MATCH.

6.3) Производится продольная расстановка обмоток в рабочие положения (расстановка обеспечивается накладными пластинами корпуса), сборка корпуса секции и последующая сборка электрических и гидравлических соединений, в том числе вывод соединений датчиков положения пучка и цепей прогрева вакуумной камеры.

7.1) После сборки элементов магнитной системы части «С» и части «В» производят монтаж секций INSERT-2 (up)/INSERT-3 (down) и INSERT-3 (up)/INSERT-2 (down) (рисунок А.3), по пп.4.5. части «В».

7.2) В зазор (между обмотками и тороидом) устанавливаются сильфонные узлы вставок INSERT.

7.3) Выполняется сборка вставок по пп.4.8 части «В».

8) Вакуумное оборудование участка охлаждения устанавливается в соответствии с планом монтажа вакуумной системы СЭО.

9) После окончательной сборки элементов магнитной системы участка охлаждения требуется проверка положения элементов при помощи лазерного трекинга и корректировка выставки элементов при необходимости.

¹ TOR90-1 (up)/ TOR90-2 (down) и TOR90-2 (up)/ TOR90-1 (down) рисунок А.3.

² Ни одна из пар тороидов при выполнении монтажных работ СЭО не может быть установлена до выполнения магнитных измерений секций соленоида, так как на подставках тороидов требуется организация креплений измерительного оборудования.

Приложение Б
(справочное)

Фотографии основных частей СЭО коллайдера NICA

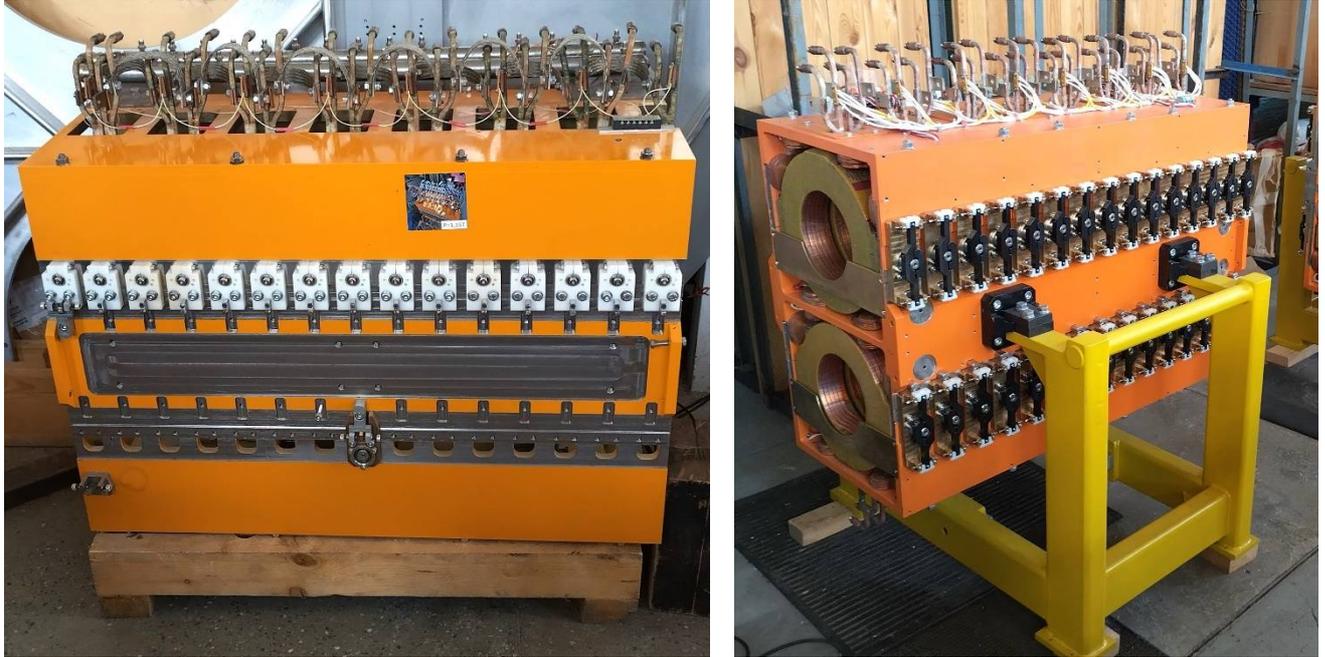


Рисунок Б. 1 – Прототип (слева) и рабочий вариант (справа) секций соленоида охлаждения

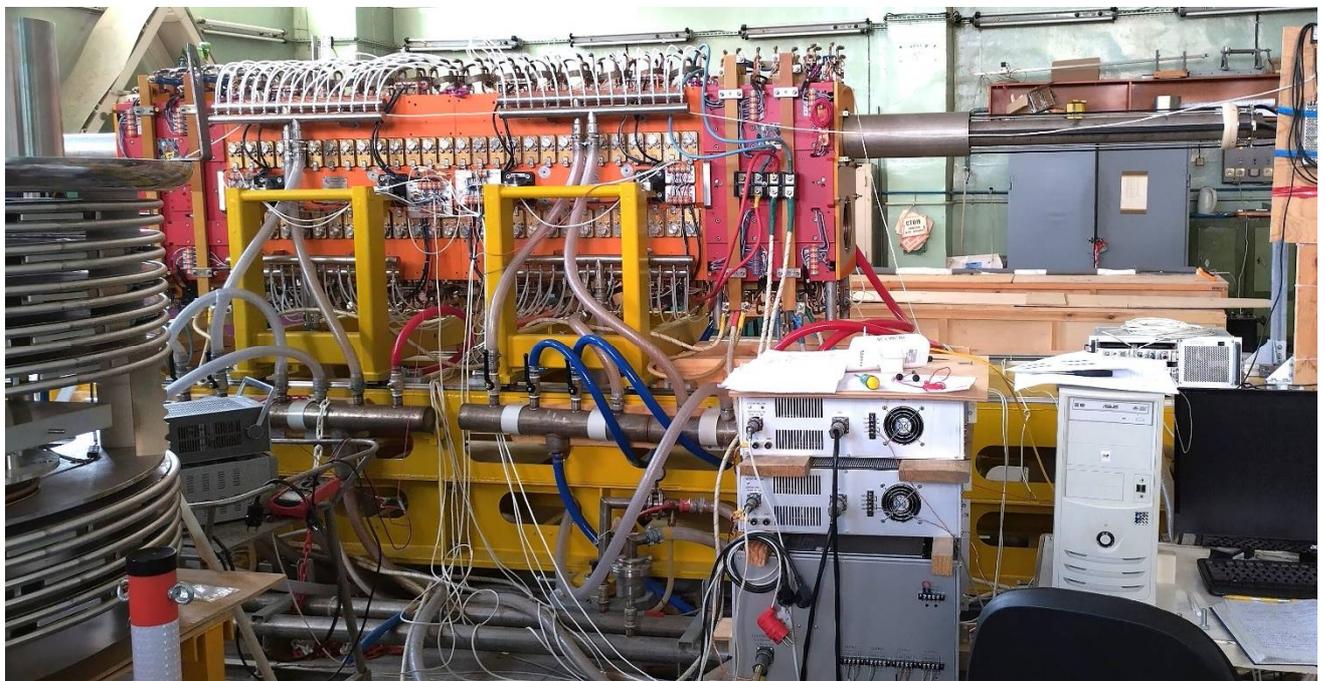


Рисунок Б. 2 – Магнитные измерения участка соленоида охлаждения с согласующими секциями. Вид с внешней стороны (в сторону высоковольтных баков). В левой части рисунка хорошо различимы секции высоковольтной части (с внешними защитными кольцами)

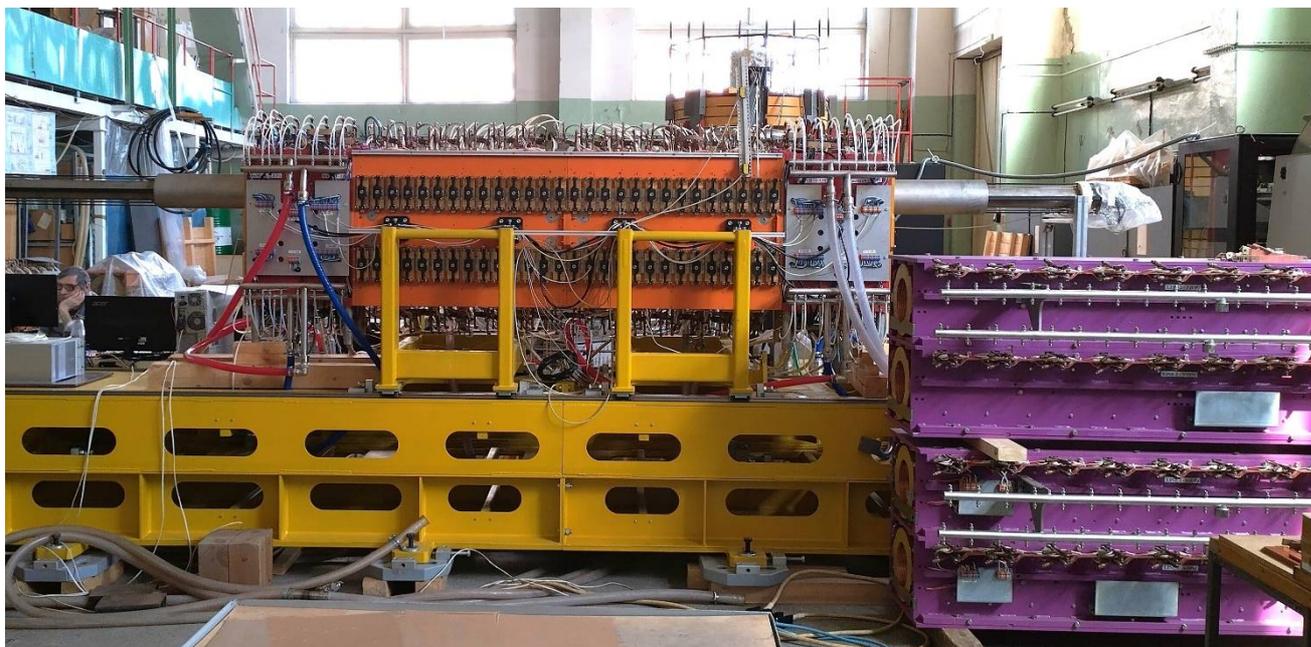


Рисунок Б. 3 – Магнитные измерения участка соленоида охлаждения с согласующими секциями. Вид с внутренней стороны (от высоковольтных баков). В правом нижнем углу изображения хорошо различимы секции LINE2 (цвет – фиолетовый) транспортной части магнитной системы СЭО

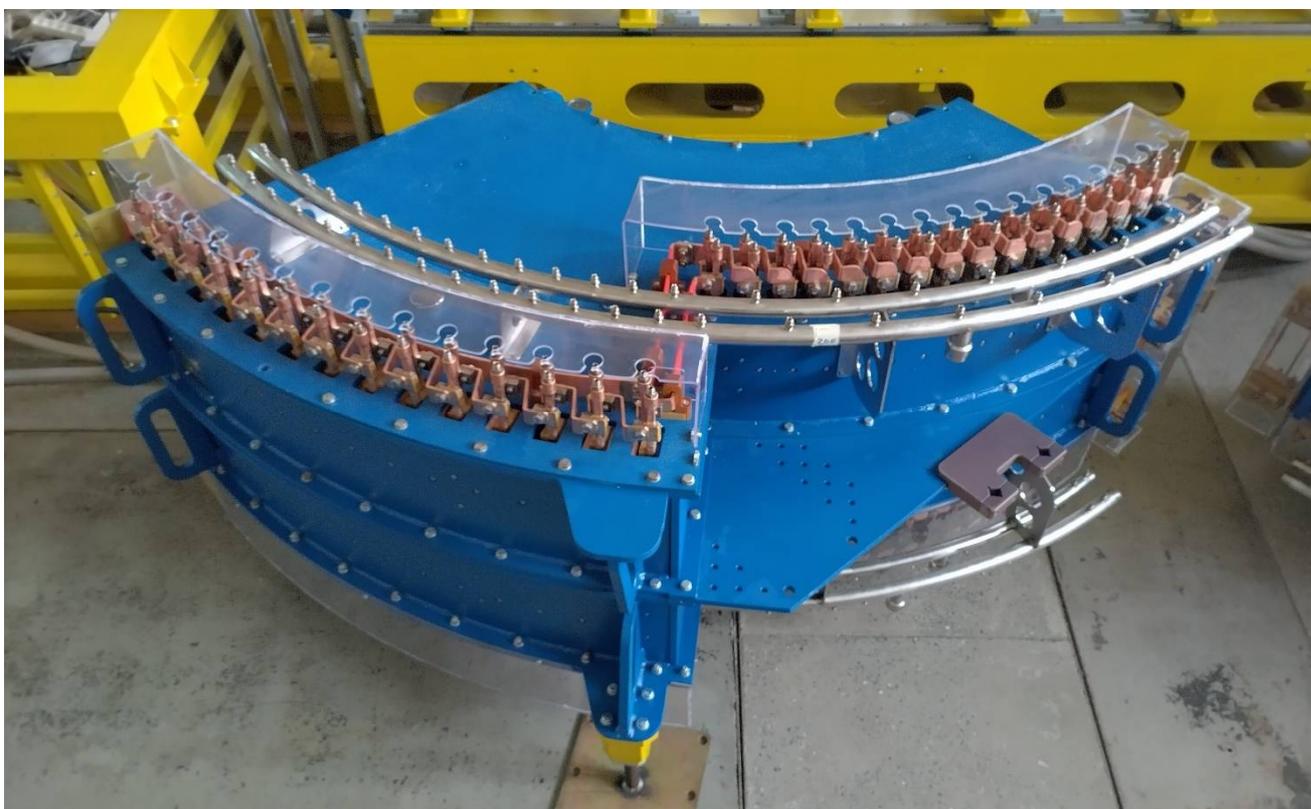


Рисунок Б. 4 – Торойд TOR90 («желтый»¹ вариант)

¹ Согласно рисунку В.2.



Рисунок Б. 5 – Магнитные измерения участка из двух транспортных соленоидов LINE2



Рисунок Б. 6 – Гирдеры предназначенные для размещения двухканальных транспортных соленоидов LINE2 внутри проемов радиационной защиты между помещением высоковольтных баков СЭО и тоннелем коллайдера NICA



Рисунок Б.7 – Участок входа/выхода из высоковольтного объема.

На желтой раме, заканчивающейся опорной площадкой высоковольтного бака (не установлен), зеркально располагаются элементы (слева на право):

- 1) вставка LINE08 (LINE08-2 (down) и LINE08-1 (down)), цвет – желто-оранжевый,
- 2) поворотный соленоид BEND (BEND-4 (down) и BEND-1 (down)), цвет – синий,
- 3) согласующая секция 0,5-1 кГц (НМАТН-2 (down) и НМАТН-1 (down)), цвет – красный



Рисунок Б.8 – Участок поворотов (рисунок Б.7). С внутренней стороны поворотов



Рисунок Б.9 – Участок поворотов от высоковольтных баков (условно располагаются в правой части изображения) в направлении прямолинейного транспортного участка. С внешней стороны поворотов. На снимке изображены (сверху вниз):

- 1) вставки транспортного канала (INSERT-4 (up), INSERT-5 (up), INSERT-1 (down)), цвет – красный
- 2) горизонтальные повороты (BEND-3 (up) и BEND-1 (down)), цвет – синий;
- 3) вставка транспортного канала (LINE18-1(down)), цвет – фиолетовый (под поворотом BEND-3 (up))

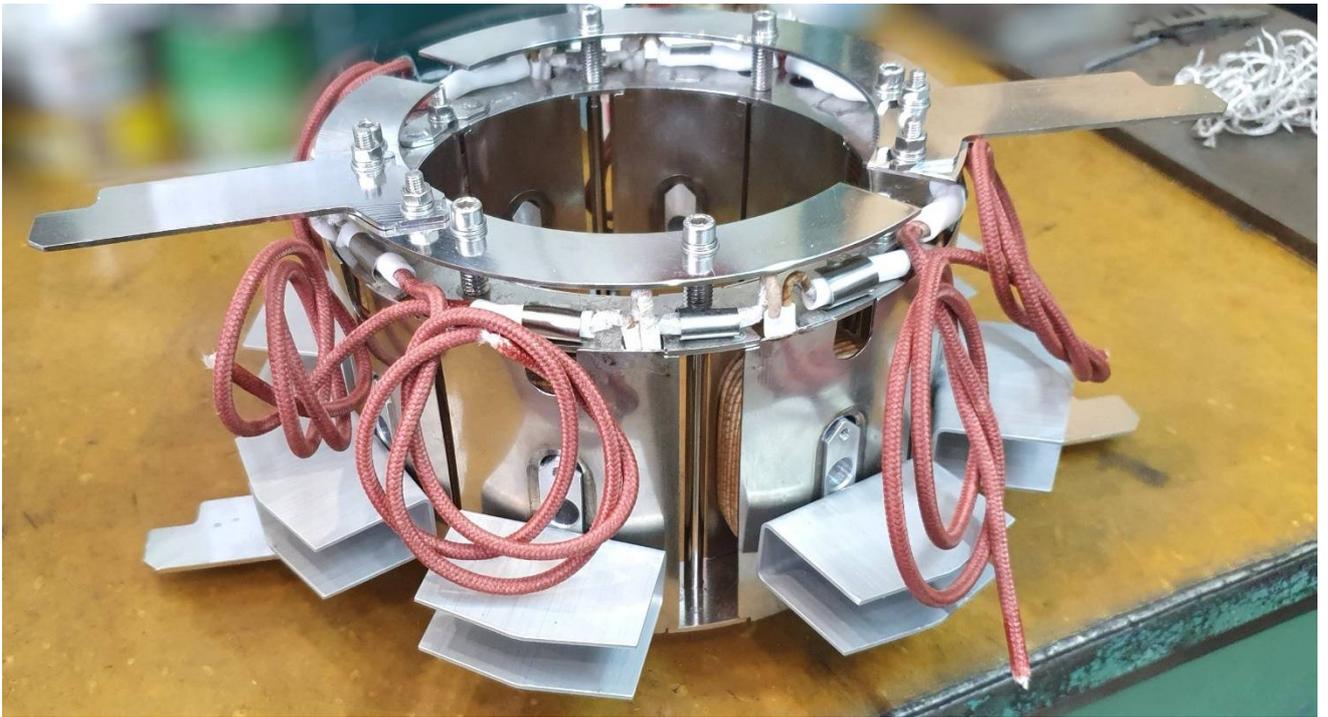


Рисунок Б.10 – Дипольный корректор вставки транспортного канала (INSERT)

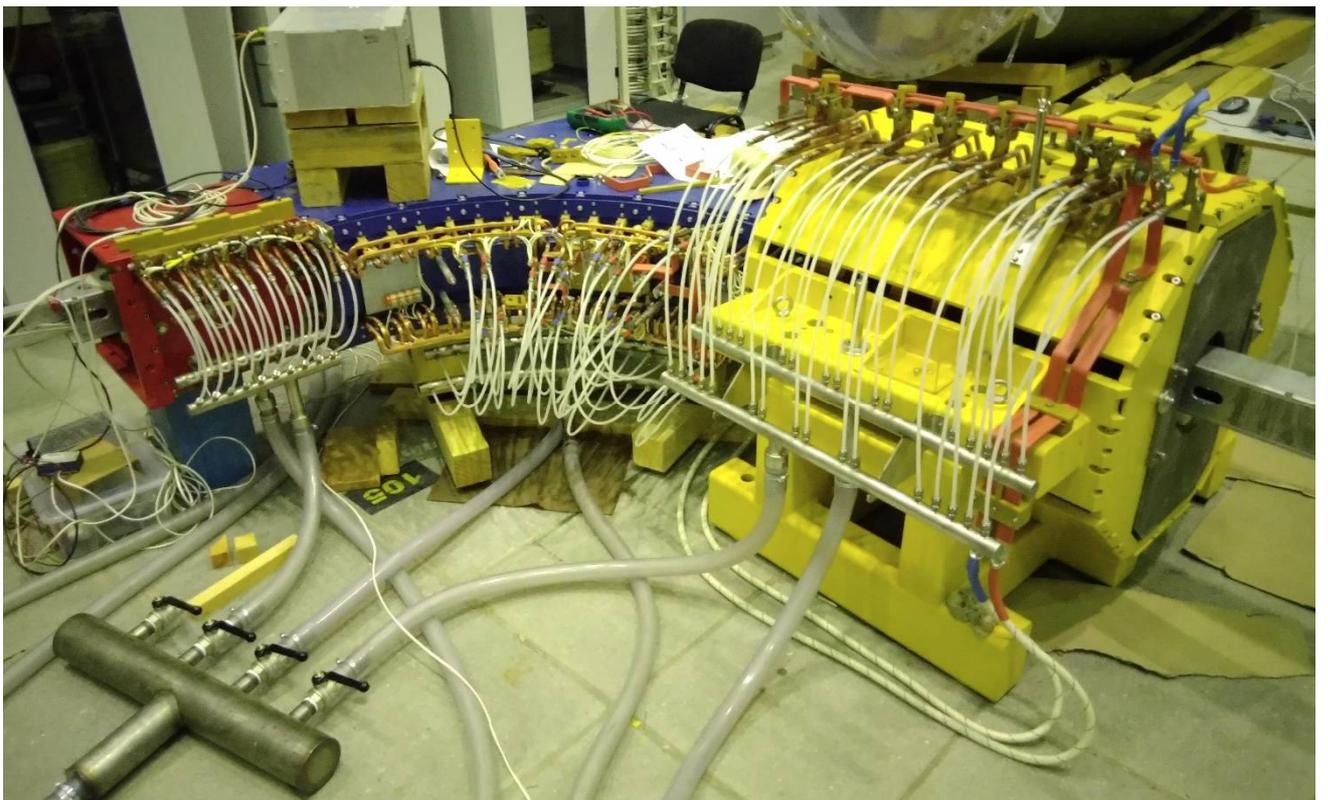


Рисунок Б. 11 – Магнитные измерения соленоидов, примыкающих к повороту транспортной части СЭО. Вид с внутренней стороны поворота. На снимке изображены (слева на право):
 1) вставка INSERT-1 (up), цвет –красный, 2) поворотный соленоид BEND-2 (up), цвет – синий,
 3) вставка LINE08-1 (up), цвет – желто-оранжевый



Рисунок Б. 12 – Высоковольтные баки и элементы магнитной системы СЭО в «темном зале» во время магнитных и геодезических измерений в ИЯФ СО РАН

Приложение В

(справочное)

СЭО коллайдера NICA. Общие виды

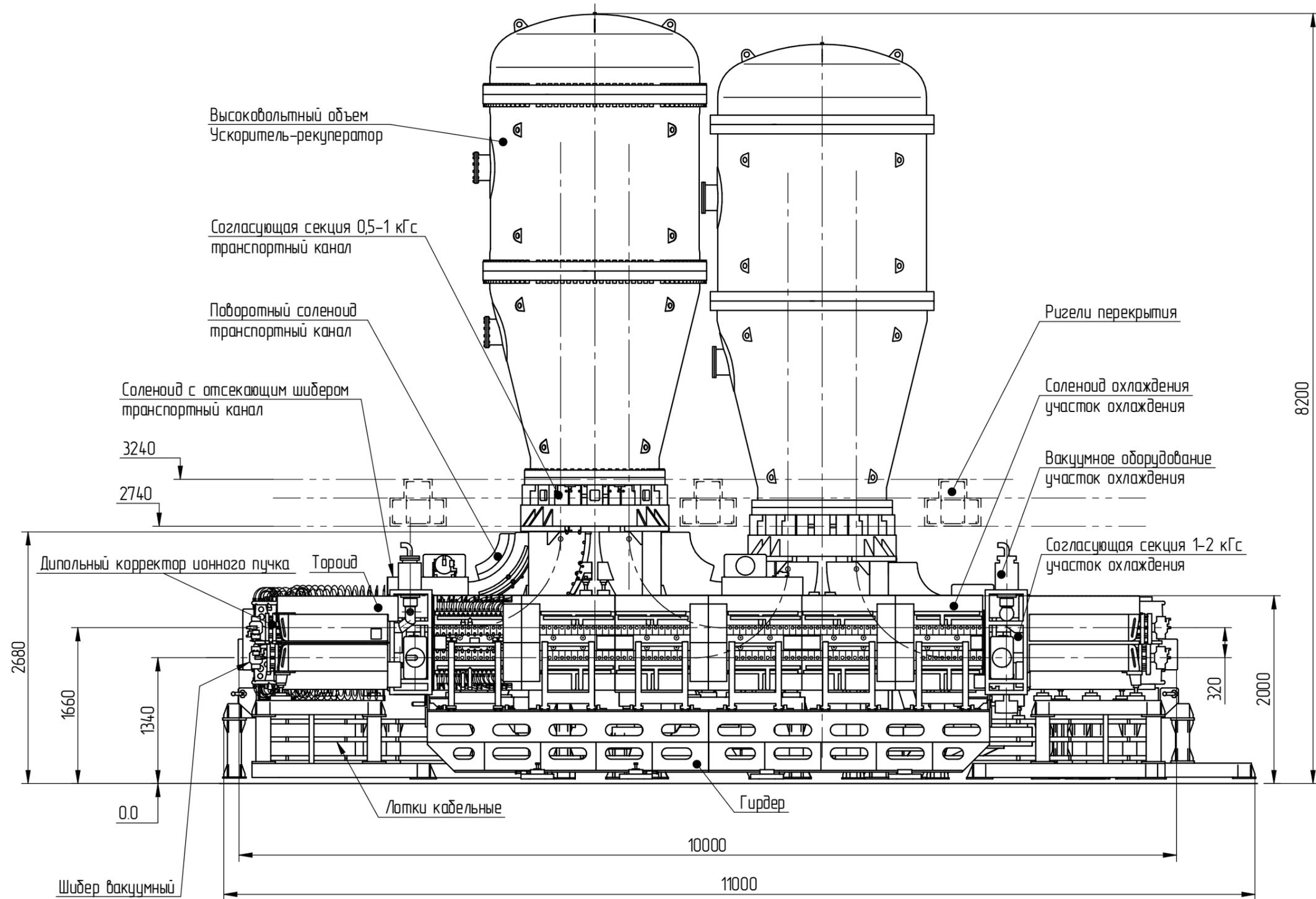


Рисунок В.1 – СЭО коллайдера NICA (вид спереди)

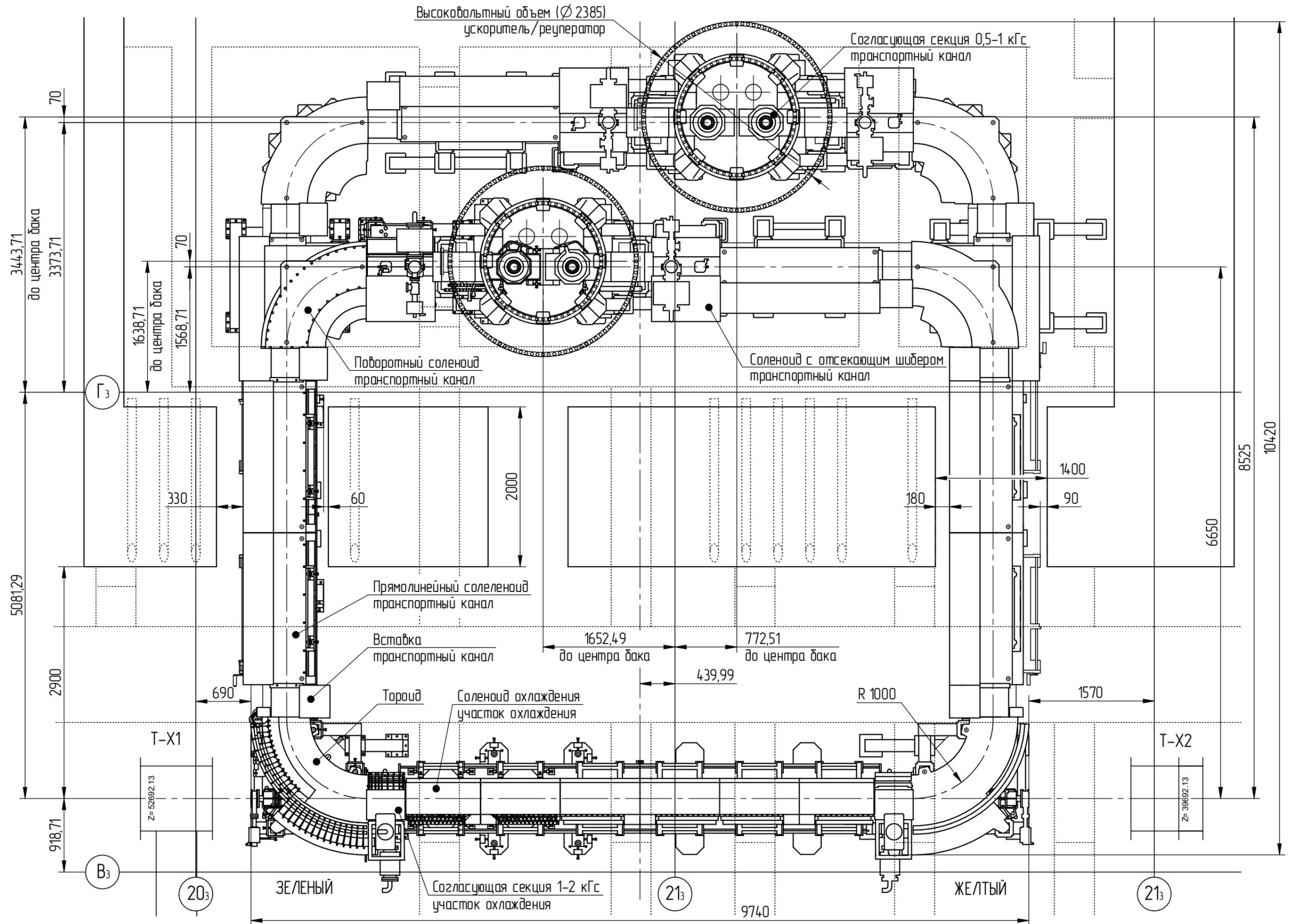


Рисунок В.2 – СЭО коллайдера NICA (вид сверху)