

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Н. С. Кремнев^{а,1}, М. И. Брызгунов^а, А. В. Бублей^а,
В. М. Константинов^а, В. Я. Корчагин^а, В. Б. Рева^{а,б},
С. И. Рувинский^а, В. М. Панасюк^а, В. В. Пархомчук^{а,б},
С. П. Посполита^а, А. А. Путьмаков^а, С. В. Шиянков^а*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Разработанная в ИЯФ СО РАН высоковольтная система электронного охлаждения коллайдера NICA является первой, которая может позволить одновременно охлаждать два ионных пучка. Ввиду того, что охлаждение должно быть установлено на коллайдер NICA, расстояние между осями пучков каналов охлаждения соответствует расстоянию между пучками коллайдера. Это стало первым, что повлияло на всю конструкцию установки. Другой фактор, непосредственно влияющий на плотность заполнения соленоидов проводником, — ограничение энергопотребления установки. Важную роль сыграли конструктивные особенности здания и последовательность окончательной сборки на месте монтажа. Описана конструкция магнитной системы высоковольтного электронного охлаждения коллайдера NICA, разработанная с учетом предъявляемых ограничений.

The HV electron cooling system for the NICA collider was designed at the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. It is the first cooling system, which will cool two ion beams at the same time. There were some external conditions to determine the design of the cooling system. The most important of them is the distance limitation between cooling channels (same as the distance between collider channels). This is the first thing that affects the whole cooler structure. The other condition, directly affecting solenoid filling by copper conductor, is the energy consumption limit. Structural features of the building and final assembly sequence at mounting place played an important role. The magnetic system design of HV electron cooler for the NICA collider, developed taking into account these limiting conditions, is described.

PACS: 29.20.—с

ВВЕДЕНИЕ

Получение пучков тяжелых ионов, обладающих высокой светимостью, плотностью и низкой температурой, требует использования различных систем охлаждения. Разработанная для этих целей в ИЯФ СО РАН высоковольтная система электронного охлаждения (СЭО) позволит одновременно охлаждать непрерывным, замаг-

¹E-mail: n.s.kremnev@inp.nsk.su

ническим электронным потоком два ионных пучка коллайдера NICA с энергиями до 4,5 ГэВ/нуклон [1]. Такая реализация системы осуществлена впервые.

Самая близкая, предшествующая, система охлаждения — высоковольтная СЭО синхротрона COSY (GSI, Германия) с энергией 2 МэВ [2]. Новая установка значительно увеличилась в размерах: длина соленоида охлаждения COSY — 2650 мм, соленоида охлаждения с согласующими секциями NICA — 6800 мм. Практически в 2,5 раза больше (причем в последней используется двойной соленоид). Энергия возросла до 2,5 МэВ.

Проектирование СЭО NICA было сопряжено с рядом ограничений. Боролись за сокращение максимального энергопотребления всей установки до 700 кВт [3], что связано с максимальным заполнением «обмоточной медью» пространства вокруг вакуумной камеры при уменьшении тепловых потерь энергии. Ограничением явилось расстояние между каналами коллайдера NICA, равное 320 мм, повлиявшее на конструкции элементов магнитной системы установки охлаждения и вакуумных камер и существенно определившее выбор схем установки обмоток и организации мест доступа к элементам вакуумных камер.

1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ

Магнитную систему СЭО NICA можно поделить на несколько вполне различных участков: охлаждения, транспортной части, ввода-вывода ионного пучка и магнитной системы электростатического ускорителя. Ввиду своего расположения последняя традиционно рассматривается принадлежащей высоковольтной части установки. Устройство магнитной системы вне высоковольтного объема приведено на рис. 1 в виде схемы.

Для обеспечения возможности работы при низкой энергии электронного пучка СЭО расположена в двух помещениях, разделенных бетонной стеной радиационной защиты толщиной 2 м, что фактически определяет поперечный размер СЭО. Длина транспортных каналов должна быть достаточной для транспортировки электронного пучка из помещения ускорителей-рекуператоров (высоковольтный объем) в соседнее помещение (тоннель коллайдера) с учетом того, что высоковольтный бак электростатического ускорителя располагается не ближе 0,5 м от стены радиационной защиты.

2. ТРАНСПОРТНАЯ ЧАСТЬ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Транспортная система установки построена на соленоидах с полем 1 кГс и очень протяженная (верхнее кольцо: 23,9 м; нижнее кольцо: 27,5 м — до фланцев соответствующих высоковольтных объемов, без учета согласующих секций (МАТЧН-1, 2, см. рис. 1) и соленоида охлаждения (COOL)).

Сборка такой последовательности соленоидов представляет собой непростую задачу. При учете только полей допусков продольных размеров получают значительные отклонения. Например, длина соленоида охлаждения для квалитетов с 10-го по 14-й (не требующих применения специальных методов обработки) меняется на величину от 1,6 до 9,8 мм [4]. Изготовление соленоидов с более высокой точностью требует

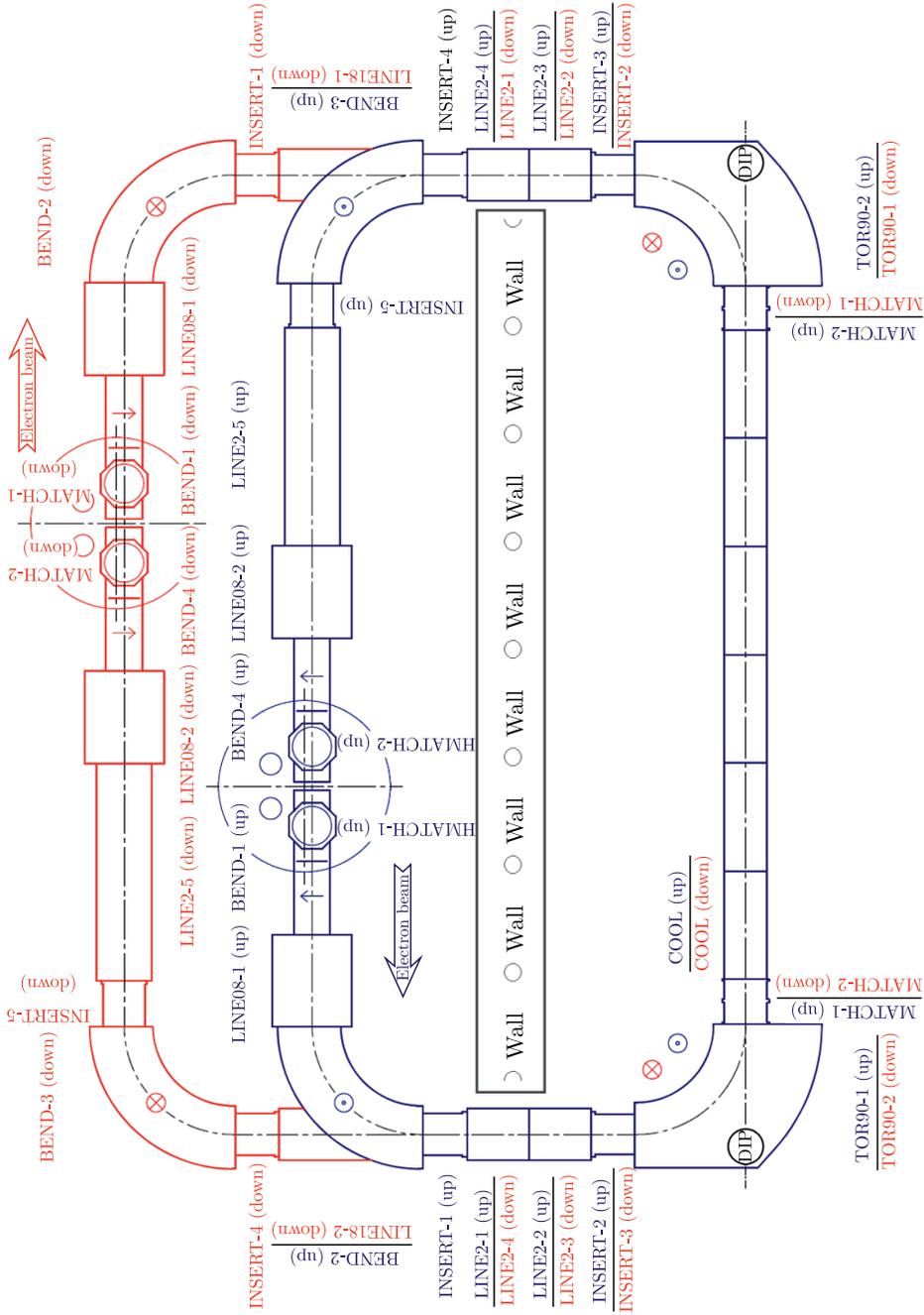


Рис. 1. Схема магнитной системы установки. Индексы up/down соответствуют верхнему и нижнему соленоидам магнитной системы. Wall — стена радиационной защиты

применения дорогостоящих способов обработки [5]. Для того чтобы обеспечить сборку соленоидов при таких значениях отклонений, в конструкции магнитной системы предусмотрены элементы с компенсационными зазорами (INSERT, LINE08, см. рис. 1). А положение элементов, определяющих траекторию движения, — поворотных соленоидов (TOR90, BEND), соленоида охлаждения (COOL) и прямолинейных соленоидов транспортного канала (LINE) — обеспечивается их выставкой в проектные координаты при помощи лазерного трекинга.

Примыкающие к тороидам вставки (пары INSERT-2 (up/down) – INSERT-3 (down/up)) являются замыкающими звеньями транспортной системы. Помимо компенсации длины прямолинейного участка в их конструкции учтена необходимость замыкания контура вакуумных камер. Все вставки сделаны так, что в зазор, образованный после выставки соседних с ними элементов (поворотов (TOR90, BEND, см. рис. 1) и прямолинейных соленоидов (LINE2, LINE2-5, LINE18)), в первую очередь устанавливаются направляющие (1, рис. 2). Они крепятся к направляющим (3) прямолинейного соленоида посредством двухосевого шарнира (2), а другая сторона устанавливается в колодку (4) с микрометрическими винтами (5) для точной юстировки направляющих, закрепленных на поворотных соленоидах. После выставления направляющих в промежутке устанавливается замыкающий сифонный узел вакуумной камеры в «поджатом» состоянии, с выполнением только одного фланцевого соединения. Формируется зазор (около 20 мм), достаточный для прохождения единичной обмотки вставки, на направляющих размещаются обмотки без фиксации, которая производится только после выполнения второго фланцевого соединения сифонного узла при том варианте сборки, что обмотки не создают механических нагрузок на сифоне и могут быть сдвинуты в любое удобное положение по направляющим. Сами направляющие в данной конструкции никаким образом не связаны с корпусами вставок.

Магнитная система транспортного участка функционально повторяет аналогичную в СЭО COSY при сопоставимых апертурах прямолинейных и поворотных магнитов, однако для улучшения механических и физических характеристик во многом переработана. В элементы, требующие частичной разборки при монтаже, введены несущие каркасы, позволяющие удерживать неподвижно направляющие основных обмоток (вставки LINE08, повороты BEND), добавлены пары с низким коэффициентом трения-скольжения. В местах, требующих подвижки обмоток, организованы кожухи электрической защиты и другие улучшения.

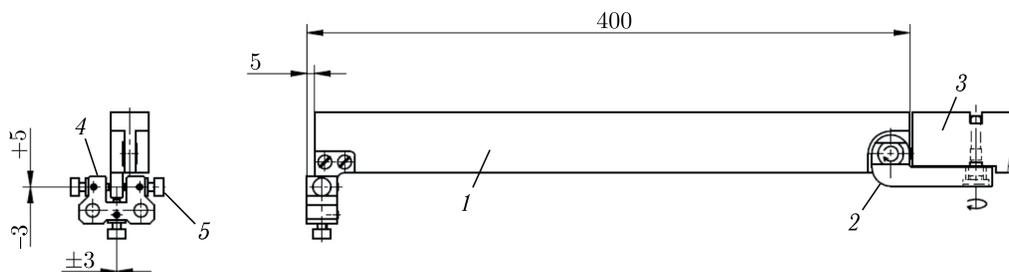


Рис. 2. Направляющая крепления обмоток вставки транспортного канала

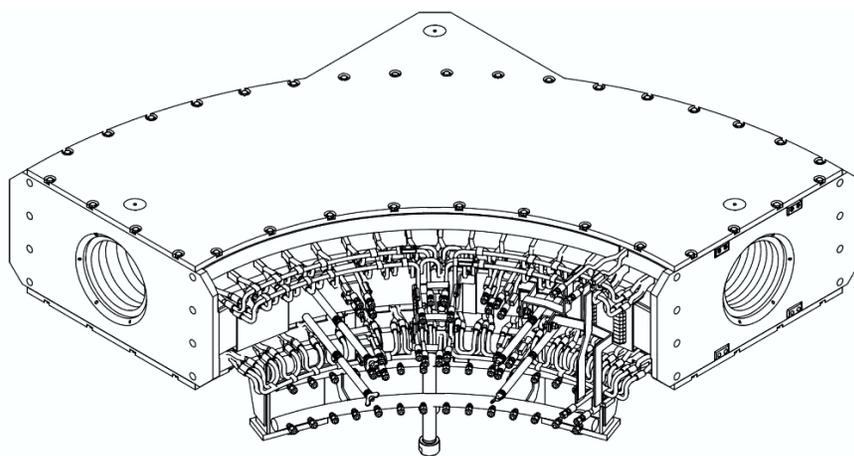


Рис. 3. Поворотный соленоид

Поворотные магниты (рис. 3), физические параметры которых определяются обмотками поворотного и ведущего поля, выполнены с применением ряда оригинальных решений: применены новые сборки обмоток, формирующих поворотное поле, совмещенные с обмотками коррекции, паяные коммутационные соединения выведены на внешнюю сторону корпуса, контуры охлаждения основных обмоток объединены в укрупненные группы для оптимизации гидравлического режима. Корпус за счет применения внешних усилителей жесткости (таких как коробчатый контур на внутреннем радиусе корпуса, между выводов обмоток, см. рис. 3) обеспечил возможность монтажа обмоток с двух сторон при снятых крышках. Расчетные деформации направляющих от веса обмоток (не закрепленных) — менее 0,1 мм.

Наименьшее число изменений выполнено в секции НМАТЧН (см. рис. 1), согласующей поле соленоидов высоковольтного объема 0,5 кГс с полем транспортных соленоидов 1 кГс. В ней улучшены способы центрирования и крепления обмоток. Переработаны детали корпусов с сохранением конструкции, использовавшейся в качестве прототипа.

3. СОЛЕНОИД ОХЛАЖДЕНИЯ

Соленоид охлаждения — одно из ключевых мест установки как с физической позиции (участок протекания процесса охлаждения), так и с инженерной (совокупность различных систем: магнитной и корректирующей, вакуумной и прогрева, диагностики пучка, питания, жидкостного охлаждения и защиты). Конструкцией соленоида обеспечивается не только качество ведущего поля, совмещение ионного и электронного пучков, но и возможность организации его сборки, размещения и обслуживания компонентов систем этого устройства.

Компоновка соленоида представлена на рис. 4. Внутри корпуса (1) размещены обмотки продольного поля (2), закрепленные в опоре (3), с узлом их юстировки (4) [6]. На внутренних поверхностях корпуса (1) устанавливаются обмотки горизонтального (5) и вертикального (6) поля корректора электронного пучка.

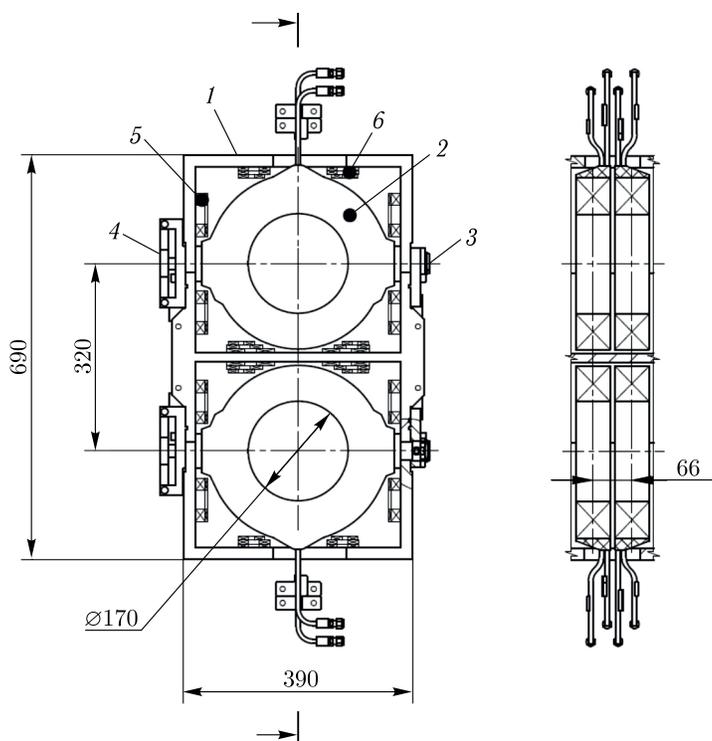


Рис. 4. Устройство соленоидов охлаждения

Соленоиды длиной 5882 мм, состоящие из 98 обмоток (в каждом канале), формирующих продольное поле на участке охлаждения величиной до 2 кГс, состоят из шести «метровых» секций (1, рис.5). Каждая секция представляет собой самостоятельное изделие с возможностью независимого подключения к электропитанию и охлаждению [7]. Секции, посредством индивидуальных подставок (2), устанавливаются на общем гирдере (3), в котором размещаются кабельные лотки (4), предназначенные для локального обустройства питания и сигнальных цепей установки. Для продольного перемещения секций по гирдере используются линейные направляющие качения.

Подобные гирдеры используются для размещения прямолинейных соленоидов (LINE2), где они расположены внутри проемов радиационной защиты (стены) тоннеля коллайдера. Их установка на гирдер осуществляется из помещения высоковольтных баков с последующим перемещением по линейным направляющим в сторону тороидов.

Внутри соленоидов размещается теплоизолированная прогретая вакуумная камера (5, рис.5) с датчиками положения пучка (пикапами).

Согласующие секции (MATCH) перехода 1–2 кГс (7), элементы откачки и диагностики вакуумной системы (8) на рис.5 — для полноты изображения обстановки. Каналы в полу помещения изображены по результатам геодезических измерений здания (ОИЯИ, Дубна), продольное положение соленоидов дано относительно проектной оси здания 21₃.

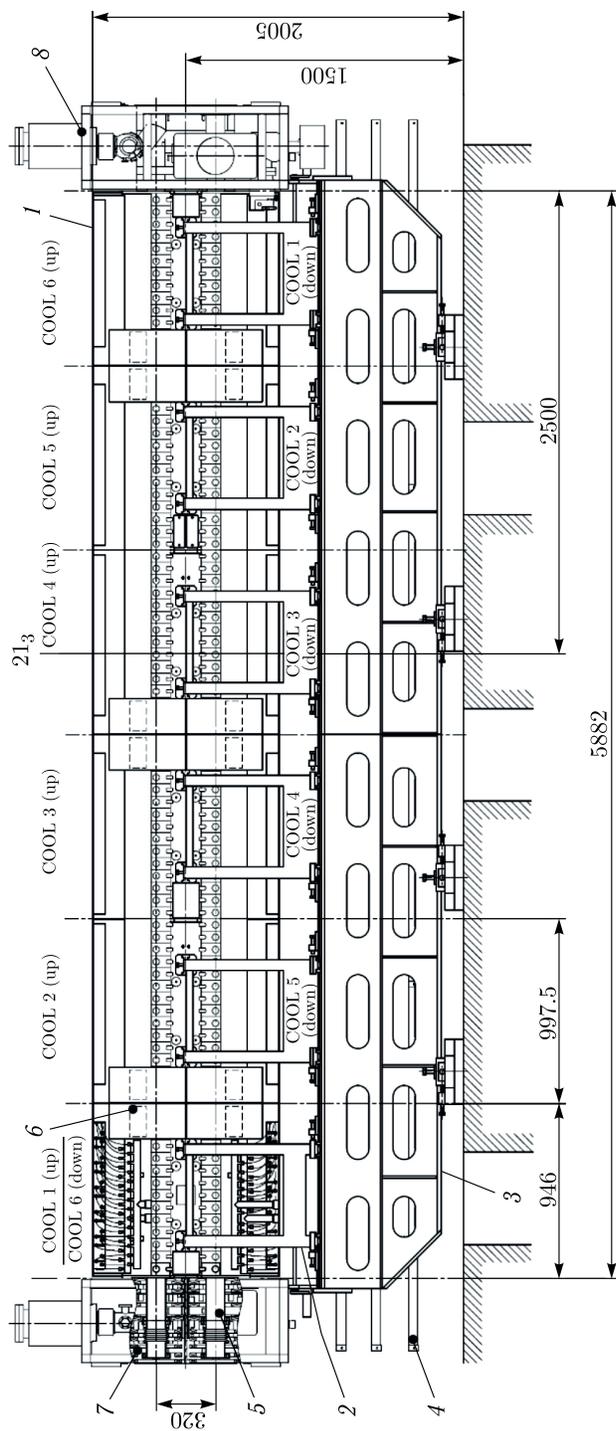


Рис. 5. Участок охлаждения. Общий вид

4. ВВОД-ВЫВОД ИОННОГО ПУЧКА

Ввод-вывод ионного пучка в СЭО NICA представляет собой участок, на котором необходимо корректно свести два пучка разных частиц. Поэтому на нем предусматриваются корректировки траекторий как ионного, так и электронного пучков. Для этого на тороидах (рис. 6) предусмотрена установка дипольного корректора ионного пучка (DIP — рис. 1; 4 — рис. 6), а поле поворотных обмоток тороида корректируется, изменяя орбиту электронного пучка. Внутри тороида устанавливается вакуумная камера сложной конфигурации с полостью для размещения дополнительных вакуумных насосов и отводом для подключения откачного вакуумного оборудования. На участке согласующей секции (MATCH) важно создать профиль изменения продольного магнитного поля, зависящий от расположения обмоток продольного поля согласующих секций и дополнительных корректирующих соленоидов и не приводящий к нагреву электронного пучка [8].

Места ввода-вывода ионного пучка (см. рис. 6), находящегося в зоне перехода Т-Х1 (обозначения ОИЯИ) и в зоне перехода Т-Х2, организованы зеркально. Их общий вид определяется тороидом (1), размещенным на подставке (2). Вакуумная камера (5) тороида соединяется с коллайдером через шиберы (6), после которых на тороид устанавливаются корректоры ионного пучка (4). К откачному порту вакуум-

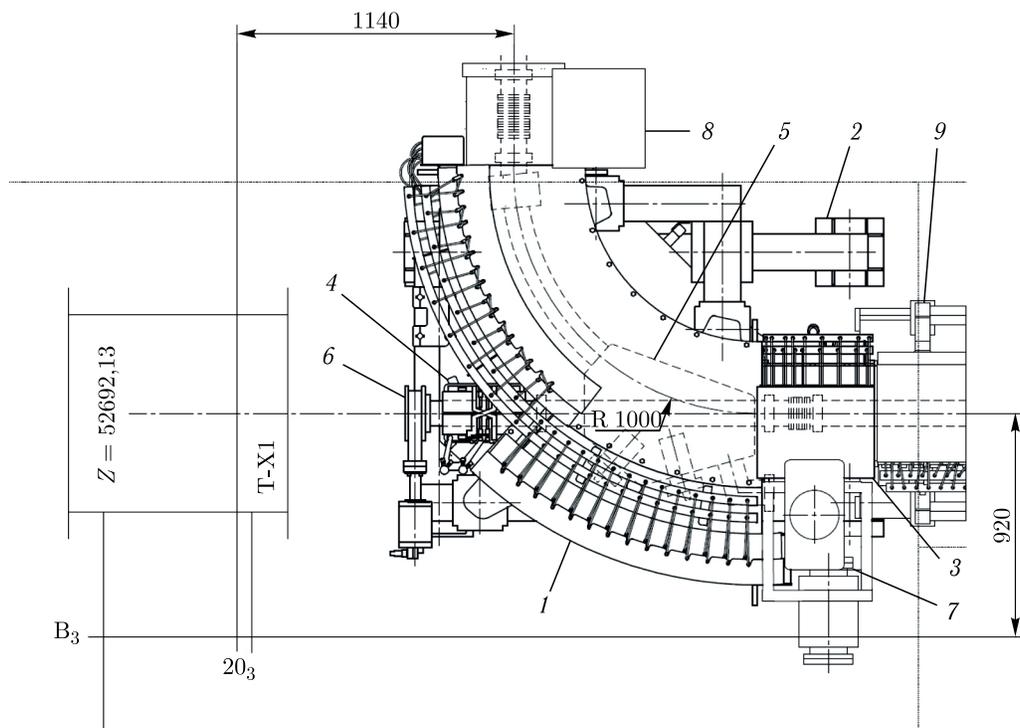


Рис. 6. Место ввода-вывода ионного пучка и переход «тепло-холод» (Т-Х1)

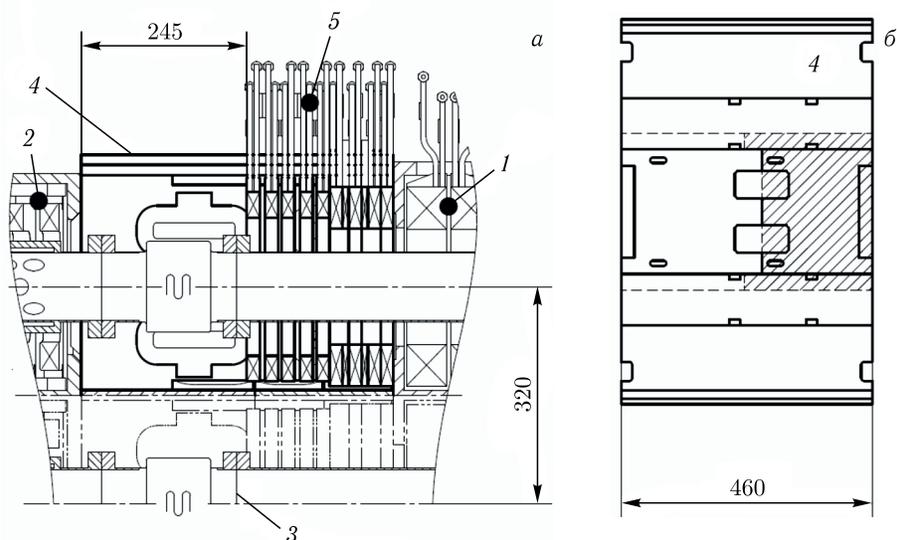


Рис. 7. а) Устройство согласующей секции (обмотки сдвинуты); б) корпус

ной камеры присоединяется откачное оборудование (7). К тороиду примыкают согласующие секции (3) перехода (MATCH) длиной 460 мм. Соленоид охлаждения (9) и вставки (8) транспортной системы на рис. 7 изображены для задания обстановки. Положение элементов дано относительно проектных осей здания (B_3 и 20_3).

Согласующие секции (пары MATCH-1 (up/down) – MATCH-2 (down/up), см. рис. 2, 7), аналогично вставкам транспортного канала (INSERT), являются замыкающими звеньями сборки участка охлаждения и обеспечивают доступ для установки сильфонных узлов (3, см. рис. 7) верхнего и нижнего каналов. Конструкция позволяет производить снятие деталей корпуса (4) при уже установленных основных обмотках (5) секции, обеспечивая при этом проход «поджатого» сильфонного узла в промежутке, составляющем 245 мм, между обмотками и стенкой тороида. Предусмотрена возможность снятия примыкающей к нему части корпуса. При этом оставляется только часть, закрепленная на соленоиде охлаждения (заштрихованная область, см. рис. 7). Сборка всех корпусных деталей секции производится за счет резьбовых соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструктивные решения элементов магнитной системы СЭО коллайдера NICA, составляющей значительную часть установки, были выработаны с учетом множества внешних (основных: конфигурации коллайдера, расположения в помещении, сокращения энергопотребления установки) и внутренних факторов (получения электронного пучка с определенным профилем и температурой, возможности проведения корректировок, организации сборки и доступа к оборудованию установки и др.). При этом учитывалась конструкция коллайдера и обстановка, созданная его оборудованием, особенности здания, возможности использования различных грузоподъемных

средств. Это повлияло на деление изделий по массе, количеству меди в магнитных элементах, поперечному размеру элементов и расстоянию между ними.

В отличие от техники, выполненной на несопрягаемых элементах (отдельно стоящих магнитных элементах), в системах с протяженными соленоидами необходимы решения, позволяющие замкнуть корпус (экранов-магнитопроводов) соленоидов и обеспечивающие возможности компенсации линейных размеров сопрягаемых элементов. Таких решений существует множество, но реализация СЭО NICA построена на идее достижения требуемых параметров расположения элементов по их проектным координатам, с компенсациями расхождений без механических доработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Ред. И. Н. Мешков, Г. В. Трубников. Т. 3. Дубна, 2015. 141 с.
2. *Брызгунов М. И., Камерджиев В. С., Пархомчук В. В., Рева В. Б.* Особенности динамики охлаждения на высоковольтной установке электронного охлаждения COSY // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 8. С. 124–131.
3. *Reva V. B., Bryzgunov M. I., Bublely A. V., Goncharov A. D., Kremnev N. S., Panasyuk V. M., Parkhomchuk V. V., Polukhin V. A., Putnikov A. A.* High Voltage Cooler NICA Status and Ideas // Proc. of the 11th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2017), Bonn, Germany, Sept. 18–22, 2017. TUM21.
4. ГОСТ 25348-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Ряды допусков, основных отклонений и поля допусков для размеров свыше 3150 мм. М., 2018.
5. *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 // Тр. XIII Междунар. конф. по ускорителям частиц высоких энергий. Ч. 1. Новосибирск, 1987. С. 341.
6. *Kremnev N. S., Bryzgunov M. I., Bublely A. V., Panasyuk V. M., Parkhomchuk V. V., Putnikov A. A., Reva V. B., Shiyankov S. V.* Adjusting Unit of Longitudinal Field Coils for NICA HV Electron Cooler's Solenoid // Proc. of the 12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2019), Novosibirsk, Russia, Sept. 23–27, 2019. TUPS21. P. 127–128.
7. *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.
8. *Panasyuk V. M. et al.* The Magnetic System of Electron Coolers of Collider NICA // Proc. of the 12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2019), Novosibirsk, Russia, Sept. 23–27, 2019. TUPS15. P. 112–115.

Получено 15 сентября 2023 г.