

КОНСТРУКЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

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

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Проектируемая в ИЯФ СО РАН высоковольтная система электронного охлаждения (далее СЭО) коллайдера NICA является единственной установкой в мире, которая создается для коллайдера и позволяет одновременно охлаждать замагниченным электронным потоком два ионных пучка с энергией до 4,5 ГэВ/нуклон.

Ввиду того, что система охлаждения должна быть установлена на коллайдер NICA, расстояние между осями пучков каналов охлаждения соответствует расстоянию между пучками коллайдера и равно 320 мм. Это стало первым фактором, влияющим на всю конструкцию СЭО, и ограничило максимально возможный внешний радиус обмоток продольного поля. Еще одним фактором можно назвать ограничение в энергопотреблении установки в 500–700 кВт, что непосредственно влияет на плотность заполнения соленоидов проводником. В статье описана конструкция центрального соленоида (соленоида охлаждения) СЭО, разработанная с учетом предъявляемых ограничений.

The electron cooling system for the NICA collider designed at the Budker Institute of Nuclear Physics is the world's first cooler which can cool two ion beams at the same time with energy up to 4.5 GeV/u by magnetized electron beam.

The electron cooling system for the NICA collider has a distance limitation between cooling channels (same as distance between collider channels) of 320 mm. This became the first condition that affects the whole cooler structure and limits the maximal possible outer radial dimensions of longitudinal field coils. The other condition is the energy consumption limit at 500–700 kW, directly affecting solenoid filling by copper conductor. The article describes the cooling solenoid design provided according to these limiting conditions.

PACS: 29.20.db; 29.27.Eg

ВВЕДЕНИЕ

С позиции построения магнитной, ускоряющей и других систем установки ближайшим аналогом СЭО NICA [1] является электронное охлаждение для синхротрона COSY (Юлих, Германия) [3]. Магнитная система этих установок электронного

¹E-mail: n.s.kremnev@inp.nsk.su

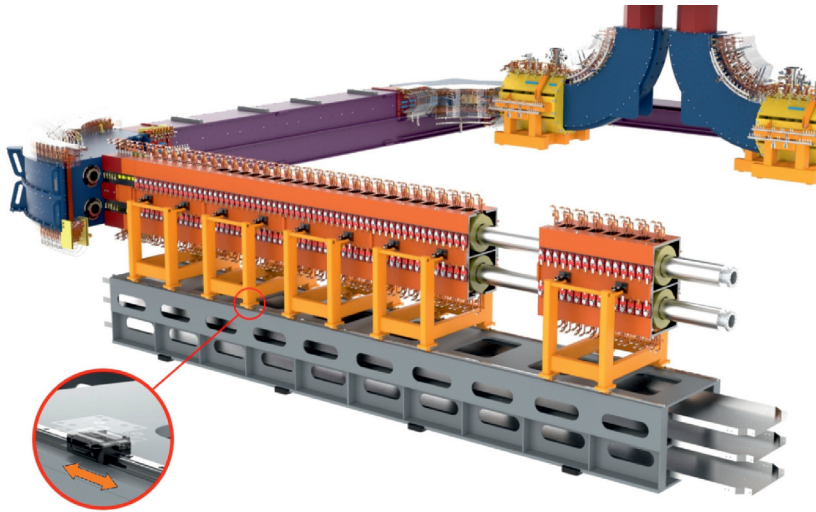


Рис. 1. Надвигка секции соленоида охлаждения СЭО NICA

охлаждения представляет собой протяженный соленоид с несколькими поворотными участками. Суммарная длина соленоидов HV кулера NICA — 30 и 33,6 м соответственно для верхнего и нижнего каналов охлаждения, для сравнения: длина соленоидов кулера COSY составляет примерно 22,5 м [3]. Основным магнитным элементом СЭО NICA является соленоид охлаждения, где происходит взаимодействие пучка ионов с электронами; от качества его изготовления зависит скорость охлаждения.

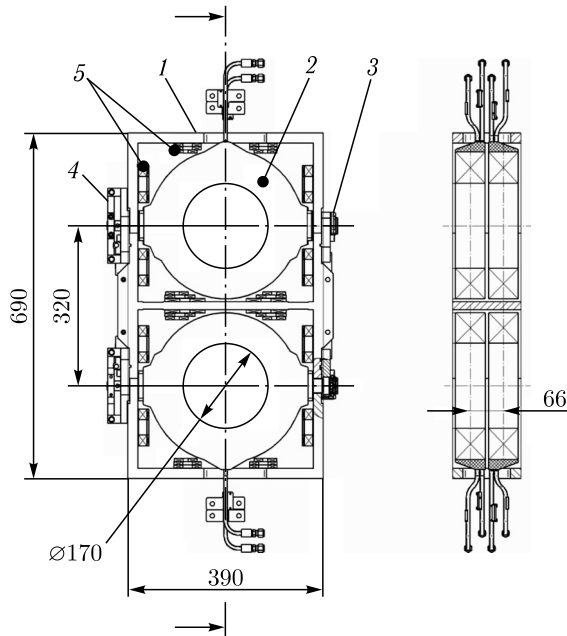


Рис. 2. Устройство соленоида охлаждения: 1 — магнитопровод; 2 — основная обмотка; 3 — опора основной обмотки; 4 — юстировка основной обмотки; 5 — корректирующие сборки

1. КОНСТРУКЦИЯ СОЛЕНоиДА ОХЛАЖДЕНИЯ

Внешне корпус соленоида охлаждения представляет собой закрытый короб (магнитопровод), поделенный посередине перегородкой, разделяющей каналы охлаждения и экранирующей магнитные поля одного соленоида от другого (рис. 2).

Основные обмотки, создающие продольное (ведущее) поле соленоида, располагаются вокруг вакуумной камеры. Они выполнены из медной водоохлаждаемой шинки (плотность тока $4,58 \text{ А/мм}^2$) зеркальными парами (левая и правая) с целью компенсации поперечных токов на внутренних переходах шинки, при этом переходы уложены максимально плотно (рис. 3, а-з), так что суммарные потери на переходах не превышают половины витка и компенсируются дополнительно уложенными четвертями

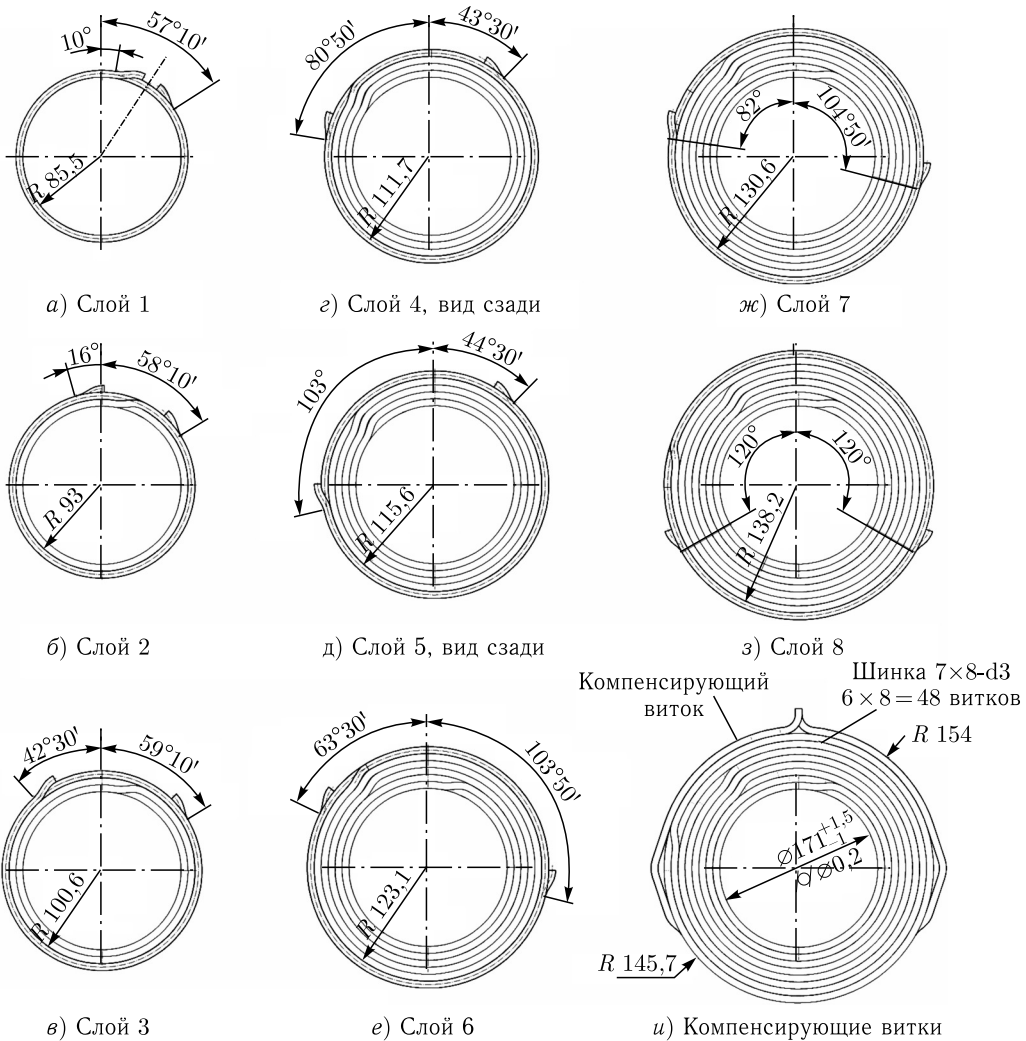


Рис. 3. Основная обмотка. Схема намотки

витков в верхней части обмотки (рис. 3, *и*). Также для более равномерного распределения переходов в конструкции обмотки заложена двойная смена навиваемой части шинки (рис. 3, *г* и 3, *е*), позволившая распределить переходы в пределах углов в 120° относительно вертикальной оси обмотки (рис. 3, *з*). Всего обмотка содержит 48 витков и питается током 220 А, рассеивая при этом мощность 711 Вт, с требуемым расходом охладителя (воды) 0,8 л/мин (при перепаде давления 8 бар). В корпус обмотки установлены при помощи полуосей, с соосностью в 50 мкм, что необходимо для исключения внецентренного вращения обмотки при юстировке [4].

Каждый канал соленоида охлаждения содержит 90 обмоток ведущего поля (64 кВт), расположенных с шагом 66,5 мм, и имеет независимый источник питания. Полная длина секции охлаждения «по стали» 6015 мм. На внутренней части стенок корпуса (магнитопровода) в каждом канале располагаются сборки обмоток коррекции, выполненные из неохлаждаемого проводника. Каждый канал секции охлаждения имеет по шесть вертикальных и горизонтальных корректоров магнитного поля, что позволит в некоторых пределах править прямолинейность силовой линии магнитного поля непосредственно во время эксперимента.

2. ЮСТИРОВКА ОСНОВНЫХ ОБМОТОК

С учетом нормального номинального зазора между корпусной изоляцией обмотки и магнитопроводом в 5 мм внешний радиус обмотки принят в $146^{+1,5}$ мм, что при сечении обмотки $61,2 \times 56^{+2}$ мм и заданном шаге установки обмоток обеспечивает возможность юстировки обмоток ведущего поля соленоида охлаждения не хуже чем ± 20 мрад.

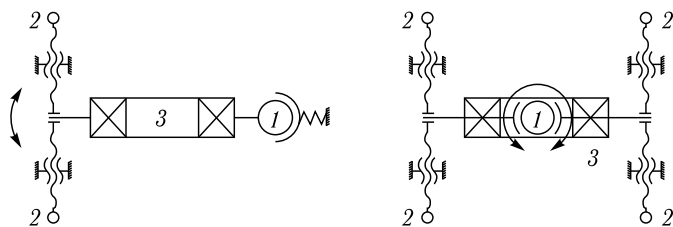


Рис. 4. Кинематическая схема механизма горизонтальной юстировки (слева) и наклона (справа) основных обмоток

Механизм юстировки обмоток ведущего поля организован по принципу наклон-поворот и построен согласно схеме (рис. 4), где обмотка (3), закрепленная в шаровой опоре (1), смещается при помощи четырех прецизионных микрометрических винтов $M6 \times 0,5$ (2), обеспечивающих достаточную точность регулировки в 10 мрад на один оборот винта. Опора (1), для исключения люфтов в зазорах сферического подшипника, имеет пружинный узел предварительного натяжения, задача которого исключить влияние веса обмотки на образование люфтов в опоре.

3. ВАКУУМНАЯ КАМЕРА УЧАСТКА ОХЛАЖДЕНИЯ

Ввиду того, что вакуумная система должна обеспечивать вакуум в 10^{-11} мбар [2], вакуумная камера должна быть прогреваемой, что, в свою очередь, делает необходи-

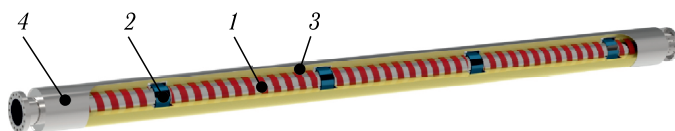


Рис. 5. Вакуумная камера соленоида охлаждения: 1 — прогрев; 2 — пикап; 3 — изоляция; 4 — кожух

мым применение тепловой изоляции обмоток соленоида от нагретой вакуумной камеры. Однако использование стекловолоконных материалов не позволяет выдержать равномерный зазор, необходимый для установки камеры в соленоид (изоляция задирается, препятствуя перемещению вакуумной камеры внутри обмоток при сборке). Для формирования гладкой наружной поверхности изолированной вакуумной камеры на СЭО NICA будет применен кожух из немагнитной стали (рис. 5), наружный диаметр которого 165 мм. Таким образом формируется равномерный зазор в 2,5 мм, необходимый для монтажа секций соленоида при помощи их накатывания на камеру (см. рис. 1). Длина одной камеры 3 м, каждая камера содержит четыре пикапа (см. рис. 5).

4. ОПОРЫ СЕКЦИЙ СОЛЕНОИДА ОХЛАЖДЕНИЯ

Участок охлаждения кулера состоит из шести секций длиной 997,5 мм (условно — метровых), содержащих по 15 обмоток ведущего поля на канал, и с обеих сторон заканчивается переходными секциями, согласующими переход между транспортными каналами (поле ≈ 1 кГс) и участком охлаждения (поле ≈ 2 кГс) без возбуждения поперечного движения электронов. Каждая «метровая» секция устанавливается на индивидуальной, подвижной, промежуточной опоре (см. рис. 1), имеющей дополнительную юстировку секции, вдоль оси пучка коллайдера, проводимую совместно с геодезическими измерениями.

Промежуточные опоры монтируются на гирдер при помощи линейных рельсовых направляющих. Для обеспечения их нормальной работы, при требуемой грузоподъемности в 1,5–2 т (вес «метровой» секции), производителем предъявляются следующие требования к параллельности базовых поверхностей и их отклонению по высоте: 25–30 мкм и 130 мкм соответственно. Результаты численного моделирования пе-

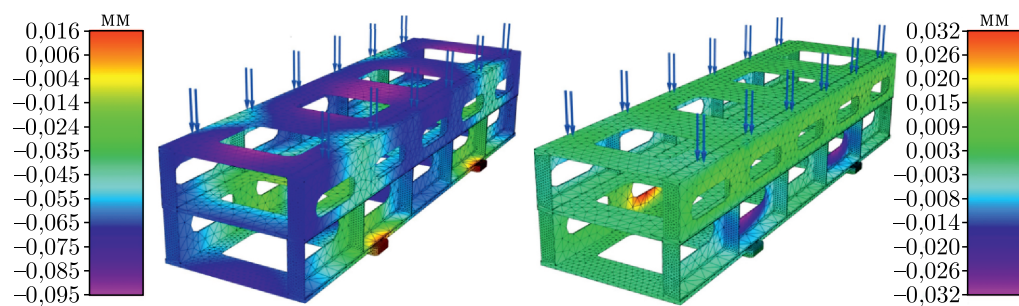


Рис. 6. Деформации гирдера под нагрузкой: слева — в вертикальной плоскости, справа — в горизонтальной

ремешений гирдера (рис. 6) при суммарной нагрузке в 60 кН показали следующие деформации базовых поверхностей: менее 75 мкм в вертикальной плоскости и в пределах ± 3 мкм в горизонтальной (относительно оси симметрии гирдера — суммарно 6 мкм). Это говорит о хорошей жесткости конструкции и с достаточным запасом соответствует требованиям к установке рельсовых направляющих.

Во внутренних полостях гирдера планируется разместить кабельные каналы силовых цепей, цепей коррекции, сигнальных цепей пикапов и цепей прогрева вакуумной камеры (см. рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененные конструктивные решения, в некоторых случаях уникальные и ранее не используемые в установках такого типа, уже показали свою оправданность и работоспособность на прототипе секции центрального соленоида [5], изготовленной в ИЯФ СО РАН в рамках проекта системы электронного охлаждения коллайдера NICA. По результатам испытаний некоторые решения были доработаны, например, описанный ранее механизм юстировки обмоток. Комплексный подход и применение современных методов проектирования позволяют решать задачи функционирования не только отдельных систем, но и их взаимодействий, что позволяет осуществлять проектирование сложнейших, уникальных физических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Под ред. И. Н. Мешкова, Г. В. Трубникова. Т. 3. Дубна: ОИЯИ, 2015. 141 с.
2. 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 COOL2017, Bonn, Germany, Sept. 18–22, 2017. TUM21.
3. Bryzgunov M., Bublely A., Panasyuk V., Parkhomchuk V., Reva V. Matching of Magnetic Field with Energy of Electrons in 2 MeV COSY Cooler // Proc. of COOL'13, Murren, Switzerland, June 10–14, 2013. WEPP07. P. 110–112.
4. Bocharov V. N. et al. Precision Measurements and Compensation for the Transverse Components of the Solenoids Magnetic Field // Instr. Exp. Techn. 2005. V. 48, No. 6. P. 772–779.
5. Parkhomchuk V. V., Bryzgunov M. I., Bublely A. V., Denisov A. P., Goncharov A. D., Kremnev N. S., Panasyuk V. M., Putnikov A. A., Reva V. B., Skorobogatov D. N. Status of the 2.5 MeV Electron Cooling System for NICA Collider // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. TUCBMH02. P. 35–38; <http://jacow.org/>.