

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*М. И. Брызгунов^{a,1}, А. В. Бублей^a, А. П. Денисов^a, А. Д. Гончаров^a,
В. В. Пархомчук^a, В. М. Панасюк^a, В. Б. Рева^{a,б}, Н. С. Кремнев^{a,б},
А. А. Путьмаков^a, О. В. Беликов^a, К. М. Горчаков^a,
Д. Н. Скоробогатов^a, В. А. Чекавинский^a, Е. А. Бехтенов^a,
А. А. Жариков^a, Г. В. Карпов^a, М. Н. Кондауров^a,
И. А. Гусев^a, Д. В. Сеньков^{a,б}*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Чтобы достичь проектной светимости в коллайдере NICA, кольцо планируется оснастить стохастическим и электронным охлаждением. Система электронного охлаждения на энергию 2,5 МэВ состоит из двух охладителей, которые охлаждают оба ионных пучка одновременно. В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ СО РАН) уже был изготовлен и запущен электронный охладитель для бустера NICA, а в настоящее время в институте разрабатывается высоковольтная система электронного охлаждения для коллайдера. В статье описана конструкция основных элементов системы и текущее состояние дел по ее изготовлению.

In order to reach project luminosity in the NICA collider it is planned to equip it with both stochastic and electron cooling. The electron cooling system at 2.5 MeV consists of two coolers, which cool both ion beams simultaneously. The Budker Institute of Nuclear Physics (BINP SB RAS) has already built and commissioned the electron cooling system for the NICA booster, and is now developing the high voltage electron cooling system for the collider. The article describes the construction and status of the cooler development.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Основным элементом комплекса NICA является коллайдер, где будут сталкиваться ионы на различных энергиях вплоть до 4,5 ГэВ/нуклон с целью изучения свойств плотной барионной материи. Для достижения проектной светимости требуется, чтобы в месте встречи сгустки (банчи) имели очень маленькие поперечные и продольные размеры при достаточно большой интенсивности. Причем эти параметры должны сохраняться во время эксперимента достаточно продолжительное время, что можно

¹E-mail: M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su

обеспечить только при помощи охлаждения непосредственно во время эксперимента. Для этого кольцо будет оснащено двумя системами охлаждения: стохастическим и электронным.

Система электронного охлаждения (СЭО) должна обеспечить электронный пучок с энергией электронов до 2,5 МэВ и с постоянным током до 1 А. Для достижения максимальной эффективности охлаждения требуется, чтобы электроны имели малые ларморовские радиусы в секции охлаждения, поэтому в процессе проектирования особое внимание было уделено качеству проводки электронного пучка вдоль системы.

1. КОНСТРУКЦИЯ СЭО

Система электронного охлаждения для коллайдера NICA состоит из двух, практически независимых, охладителей (рис. 1). Конструкция охладителей основана на конструкции высоковольтной СЭО синхротрона COSY [1]. Вся высоковольтная система каждого охладителя расположена в отдельном баке с элегазом под давлением до 8 атм. Электронный пучок рождается в пушке, расположенной в баке, и ускоряется в электростатической трубке до рабочей энергии. По транспортному каналу пучок попадает в секцию охлаждения, где взаимодействует с ионами. Далее по другому транспортному каналу пучок попадает обратно в бак, где замедляется во второй электростатической трубке и гибнет на стенках электронного коллектора. На всем пути от пушки до коллектора электроны двигаются в продольном магнитном поле для обеспечения поперечной фокусировки. В секции охлаждения продольное поле необходимо также для обеспечения так называемого быстрого охлаждения [2]. Большой

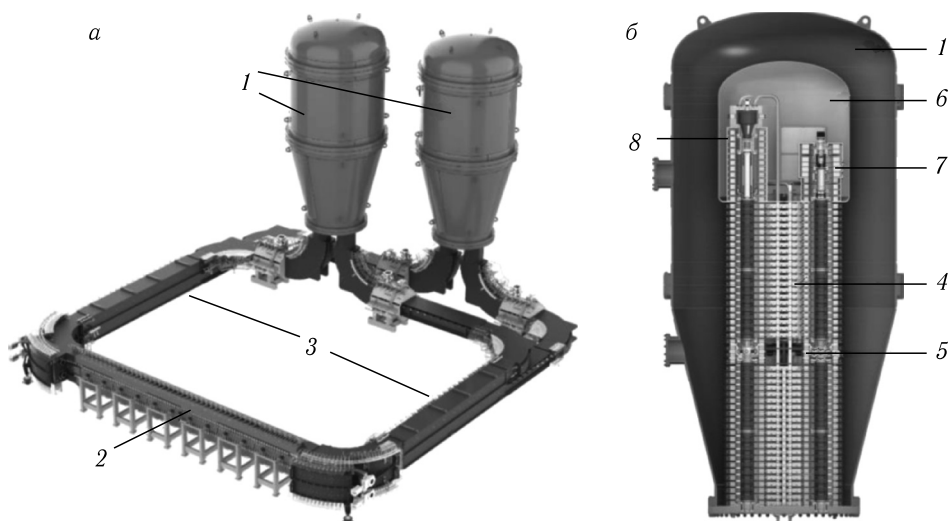


Рис. 1. Трехмерная модель СЭО коллайдера NICA (а) и схема высоковольтной системы (б): 1 — бак высоковольтной системы; 2 — секция охлаждения; 3 — транспортные каналы; 4 — высоковольтная колонна; 5 — промежуточная секция; 6 — высоковольтный терминал; 7 — электронная пушка; 8 — электронный коллектор

сложностью при разработке СЭО коллайдера NICA является малое расстояние между охлаждаемыми ионными пучками. В секции охлаждения оно составляет 32 см, что накладывает ограничение на поперечный размер катушек магнитного поля.

2. ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА

Высоковольтная система предназначена для создания, ускорения до рабочей энергии, торможения и поглощения электронного пучка. Торможение пучка перед поглощением в коллекторе позволяет реализовать схему рекуперации энергии электронов, значительно упрощая электронику и конструкцию охладителя [3]. Конструктивно высоковольтная система СЭО коллайдера NICA во многом повторяет таковую у высоковольтной СЭО COSY. Основными элементами высоковольтной системы являются высоковольтная колонна, высоковольтный терминал и каскадный трансформатор (см. рис. 1).

2.1. Высоковольтная колонна. Колонна состоит из 42 одинаковых секций толщиной 48 мм, диаметром 1,2 м с шагом 64 мм. Каждая секция содержит два высоковольтных источника на 30 кВ, включенных последовательно (всего 60 кВ), две катушки продольного магнитного поля (для ускоряющей и замедляющей трубок) и электронику для управления и связи. Поле в электростатических трубках равно примерно 500 Гс. Полная высота высоковольтной колонны 3 м. Высота бака \approx 5 м.

Колонна разделяется на две части секцией без ускорения (промежуточная секция), в которой отсутствуют высоковольтные источники (рис. 2). Данная секция предназначена для механического разделения двух участков ускорительной трубки с точки зрения их крепления. Предыдущий опыт показал, что очень высокая конструкция из ускорительных трубок, нагруженных сверху электронной пушкой, фильтром Вина и коллектором, имеет высокий риск механических повреждений в процессе сборки. Кроме того, данная секция служит для дополнительной вакуумной откачки в электростатических трубках (при помощи неиспаряемых геттеров) и для диагностики при помощи пикапов. Возможность менять наклон катушек в этой секции также дает возможность корректировать поперечное положение пучка и компенсировать возможные неточности выставки катушек в регулярных высоковольтных секциях.

Катушки высоковольтных секций (рис. 3) намотаны тонким проводом (диаметр 1,4 мм), чтобы питать их источниками относительно низкого тока (примерно 3 А). Такая конструкция позволяет упростить источники питания и повысить их КПД. Основным минусом такого подхода является менее эффективное охлаждение катушек

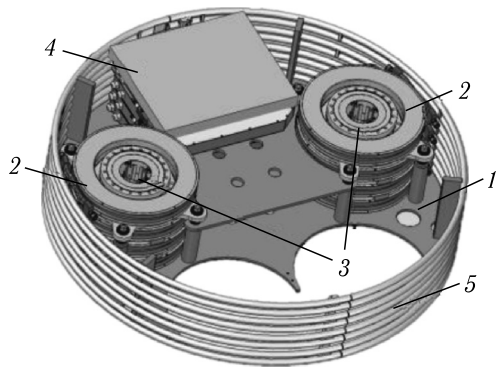


Рис. 2. Промежуточная секция: 1 — основание секции; 2 — катушки магнитного поля; 3 — вакуумные камеры; 4 — электроника; 5 — охранные кольца

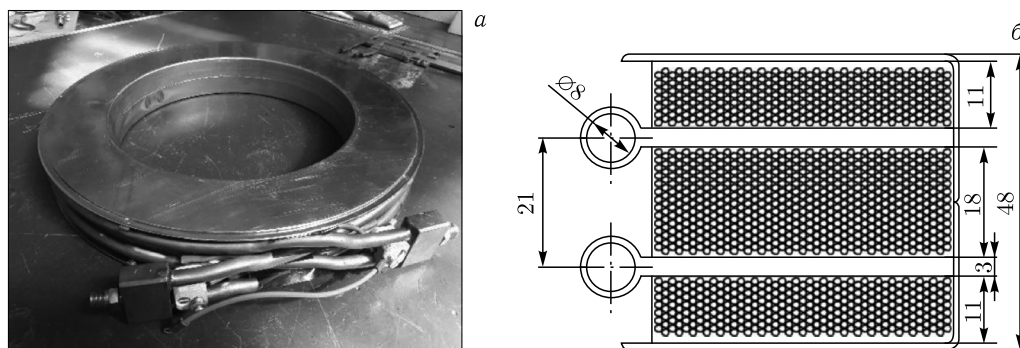


Рис. 3. Катушка высоковольтной секции (а) и ее разрез (б). Внутренний радиус катушки 120 мм

ки. Катушки с большим током могут быть намотаны из толстой шины, в центре которой есть отверстие для охлаждающей жидкости. Однако в тонком проводе нет возможности сделать такое отверстие, поэтому для охлаждения катушки внутрь ее вклеиваются две медные пластины толщиной 3 мм, к торцу которых припаяны медные трубки диаметром 10 мм. Такая конструкция позволяет эффективно охлаждать катушку, снимая примерно 100 Вт мощности.

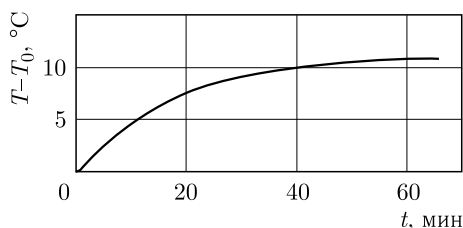


Рис. 4. Зависимость нагрева катушки от времени

подавался ток 3,35 А, что на 0,2 А выше номинального тока. Расход масла через катушку составил 1,2–1,3 л/мин (номинальный расход 1,8 л/мин).

Из графика видно, что катушка нагрелась примерно на 12 °С, т. е. такое охлаждение достаточно эффективно, чтобы снимать выделяющуюся в катушке мощность.

2.2. Высоковольтный терминал. Высоковольтный терминал расположен на высоковольтной колонне и содержит электронную пушку, электронный коллектор и электронику для управления ими.

Электронная пушка для высоковольтного охладителя NICA (рис. 5) отличается от пушки охладителя COSY. В данной пушке было решено использовать катод меньшего размера (диаметр 1 см вместо 3 см). Такое уменьшение связано с тем, что в коллайдере NICA ионный пучок имеет меньший размер, и диаметр пучка 3 см на катоде избыточен. Уменьшив размер пучка, можно повысить плотность электронов (а соответственно, и скорость охлаждения), не увеличивая ток пучка. Кроме того, транспортировка электронного пучка меньшего диаметра через СЭО значительно проще.

Для защиты катода от попадания вторичных ионов соленоид пушки изогнут в сторону. Таким образом, электроны, имеющие в области пушки малую энергию, двига-

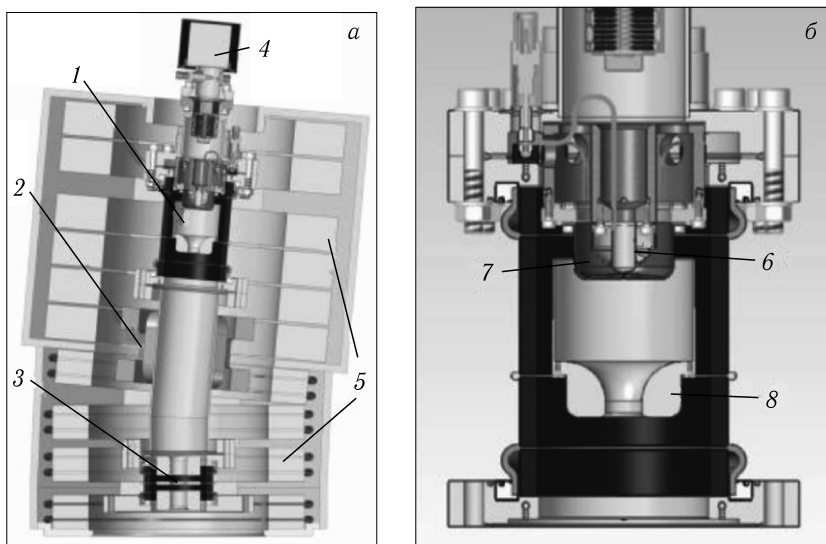


Рис. 5. Пушка СЭО коллайдера NICA: *а*) расположение пушки в соленоиде; *б*) эскиз самой пушки. 1 — пушка; 2 — корректоры; 3 — электронная линза с диафрагмой; 4 — вакуумная откачка; 5 — соленоид; 6 — катодный узел; 7 — управляющий электрод; 8 — анод

ются практически вдоль силовых линий, а ионы, имеющие большую массу, двигаются прямо и не попадают на катод.

Конструкция электронного коллектора СЭО коллайдера NICA основана на коллекторе охладителя COSY [4]. Его особенностью является подавление потока вторичных электронов (отраженных от коллектора) за счет использования дополнительной секции со скрещенными поперечными электрическим и магнитным полями (фильтр Вина). На охладителе COSY такой подход позволил добиться эффективности коллектора лучше чем 10^{-6} при токе 0,9 А.

2.3. Каскадный трансформатор. Вся высоковольтная система питается от каскадных трансформаторов [5]. В отличие от охладителя COSY, где для этого используется только один трансформатор, здесь было решено использовать два трансформатора, поскольку сама система длиннее (42 каскада вместо 33). Кроме того, промежуточная секция потребляет гораздо больше энергии, чем обычная секция.

Конструкция каскадного трансформатора во многом повторяет конструкцию трансформатора COSY, однако в нее был внесен ряд изменений, призванных улучшить его характеристики и упростить процесс изготовления. В частности, первичные и вторичные обмотки разбиты на 4 группы по 8 витков (вместо 2 групп по 14 витков). Металлические кольца корпуса было решено изготавливать из алюминия вместо покрытой медью нержавеющей стали. Под обмотки, непосредственно на сердечник, укладывается кольцо из тонкого стеклотекстолита с медным покрытием для задания потенциала сердечнику.

Для проверки новой конструкции трансформатора был изготовлен прототип из трех секций. На прототипе была измерена АЧХ (рис. 6, *а*), по которой путем подгонки теоретической кривой [5] были определены его основные параметры: резонансная

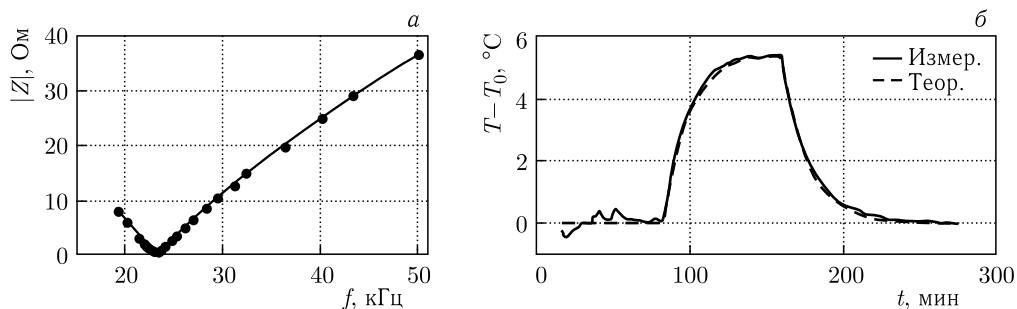


Рис. 6. Результаты испытаний прототипа трансформатора: *а*) АЧХ (точки — измерения, линия — теоретическая кривая); *б*) зависимость разности температуры масла на выходе из трансформатора и на входе при тепловых испытаниях (видны моменты включения и выключения напряжения)

частота — 23,2 кГц, индуктивность рассеяния — 50 мкГн на один каскад, проходное сопротивление — 0,11 Ом на один каскад. Полномасштабные тепловые испытания на нагрузку 8 Ом при напряжении 500 В (амплитуда) подтвердили основные параметры и показали работоспособность прототипа (рис. 6, б).

В целом по результатам измерений параметры трансформатора оказались схожи с параметрами трансформатора охладителя COSY.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках реализации проекта ускорительного комплекса NICA продолжается разработка высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера. Спроектированы основные элементы СЭО коллайдера NICA. Изготовлены и испытаны прототипы высоковольтной секции с катушками магнитного поля, трансформатора, секции соленоида охлаждения и т. д. Изготовлены баки высокого давления для высоковольтной системы и многие другие элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reva V. B. et al.* COSY 2 MeV Cooler: Design, Diagnostic and Commissioning // Proc. of IPAC 2014, Dresden, Germany. 2014. P. 777–779.
2. *Пархомчук В. В., Скринский А. Н.* Электронное охлаждение. 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 180, № 5. С. 473–493.
3. *Куделайнен В. И. и др.* Глубокое торможение электронного пучка в системе с продольным магнитным полем // ЖТФ. 1976. Т. 46, № 8. С. 1678–1686.
4. *Bryzgunov M. I. et al.* High Efficiency Electron Collector for the High Voltage Electron Cooling System of COSY // Proc. of COOL 2015, Newport News, VA, USA. 2015. P. 112–115.
5. *Брызгунов М. И. и др.* Передача мощности в установке высоковольтного электронного охлаждения для синхротрона COSY // ПТЭ. 2015. № 2. С. 14–23.