

## СОСТОЯНИЕ ДЕЛ ПО ПРОИЗВОДСТВУ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

*М. И. Брызгунов, А. В. Бублей<sup>1</sup>, А. Д. Гончаров,  
В. М. Панасюк, В. В. Пархомчук, В. Б. Рева*

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

Согласно договору установка электронного охлаждения для бустера комплекса NICA должна была быть запущена в строй в конце 2015 г. В докладе описана степень готовности различных узлов и компонентов установки по состоянию на сентябрь 2015 г. Часть доклада посвящена обсуждению параметров установки и технических решений, примененных для их достижения.

According to the agreement, the electron cooling device for the NICA booster should have been commissioned in late 2015. The report describes the readiness of various parts and components of the installation as of September 2015. Part of the report is devoted to the discussion of installation options and technical solutions used to achieve them.

PACS: 29.20.dk; 29.20.db

### ВВЕДЕНИЕ

В данной статье представлены результаты работ по договору с ОИЯИ (Дубна) на изготовление системы электронного охлаждения бустера ускорительного комплекса NICA.

*Технические требования.* СЭО должна обеспечить эффективное охлаждение тяжелых заряженных частиц — от протонов до ионов  $^{197}\text{Au}^{31+}$  и иметь основные параметры, указанные в таблице.

Основа для проекта — система электронного охлаждения, изготовленная в ИЯФ в 2006 г. для формирования сгустков ионов свинца в LEIR (LHC) ЦЕРН.

### ОБЗОР СТЕПЕНИ ГОТОВНОСТИ КОМПОНЕНТОВ УСТАНОВКИ

- Магнитная система. Полностью собрана, проведены магнитные измерения датчиками Холла. Следующий этап — настройка центрального соленоида (измерения при помощи «компас»).

---

<sup>1</sup>E-mail: bubley@inp.nsk.su

Энергия электронов $E$ , кэВ	1,5–50
Возможность перестройки энергии в данном диапазоне	
Ток электронного пучка $I$ , А	0,2–1,0
Точность регулировки энергии и ее стабильность $\Delta E/E$	$\leq 1 \cdot 10^{-5}$
Стабильность тока пучка $\Delta I/I$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
Режим рекуперации энергии электронного пучка	
Ток потерь электронного пучка $\delta I/I$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$
Напряженность продольного магнитного поля СЭО, Тл	0,1–0,2
Допустимая неоднородность продольного магнитного поля на участке охлаждения $\Delta B/B$ на длине 15 см (три периода ларморовской спирали электрона с энергией 50 кэВ в поле 0,1 Тл)	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$
Поперечная температура электронов на участке охлаждения, эВ	$\leq 0,3$
Коррекция орбиты ионов на входе и выходе СЭО:	
смещение, мм	$\leq 1,0$
угловое отклонение, мрад	$\leq 1,0$

• Вакуумная система. Закончено производство вакуумных камер элементов кулера. Следующие этапы — межузловая сборка, монтаж элементов прогрева, прогрев, получение требуемого вакуума.

• Электронная пушка и коллектор — изготовлено 70 %, изготовление керамических изоляторов, сборка пушки (катодный узел и т. д.).

• Источники питания — высокоточные источники питания поставлены в ОИЯИ. Слаботочные источники на стадии изготовления 60 %. Запуск при помощи источников, имеющихся в ИЯФ.

• Высоковольтный источник питания (пушка-коллектор) — завершена сборка части источника с трансформатором и масляным баком. Изготовление компонентов источника — 90 %, сборка и испытания компонентов источника высоковольтный терминал, генератор высокого напряжения 60 кВ.

• Система водяного охлаждения — изготовление — 60 %, запуск при помощи водяной системы, имеющейся в ИЯФ.

• Система масляного охлаждения (высоковольтный источник). Готово и испытано.

• Система УБС Электроника — 100 %. Монтаж кабелей к установке, интеграция УБС в систему управления установкой.

• Система управления — разработка — 80 %, ввод в действие на реальной установке.

• Система прогрева вакуумной камеры — сборка компонентов, испытания на тестовой нагрузке.

## МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Центральный соленоид (соленоид охлаждения) является наиболее важным элементом магнитной системы (рис. 1). Требования к качеству магнитного поля определяют требования к точности изготовления и юстировки деталей соленоида [1].

Наиболее ресурсоемким элементом является катушка центрального соленоида. Помимо намотки катушки, повышенные требования предъявляются к качеству изготовления и сборки юстировочных приспособлений. В конструкцию данной катушки были внесены заметные изменения по сравнению с дизайном предыдущих версий (LEIR, COSY),

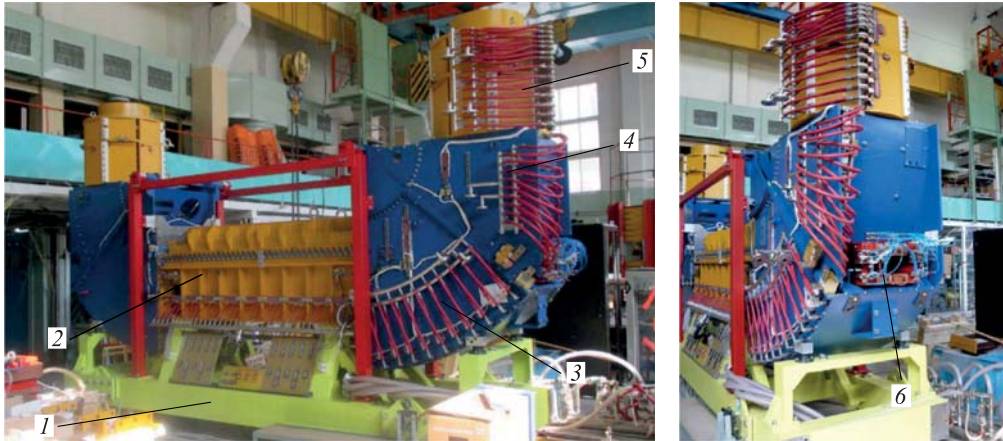


Рис. 1. Магнитная система установки электронного охлаждения: 1 — опорная рама; 2 — центральный соленоид; 3 — 50° тороид (поворот); 4 — 40° тороид (поворот); 5 — соленоид пушки (коллектора); 6 — дипольный корректор

что позволит добиться более высокого качества при использовании тех же технологий. Магнитопровод центрального соленоида во многом схож с магнитопроводами, которые установлены на предыдущих версиях кулеров, однако отличие по длине, шагу катушек и расположению опор подразумевает некоторые изменения в конструкции. Поворотные магниты (тороиды) выполнены по той же схеме, что и для установки LEIR (ЦЕРН), и служат для поворота электронного пучка на 90° с радиусом дуги траектории в 1 м. Для облегчения сборки (разборки) установки была изменена конструкция подвески 50° тороидов. В новой версии они крепятся на оси вращения, в то время как в ранних вариантах тороиды перемещались горизонтально по направляющим, а вертикально при помощи домкратов. Катушка соленоидов пушки и коллектора представляет собой круглую двуслойную обмотку, аналогичную тем, что использовались для проекта кулера LEIR [2].

Результаты магнитных измерений датчиками Холла приведены на рис. 2. Измерения проводились вдоль оси соленоида установки и включали области соленоида охлажде-

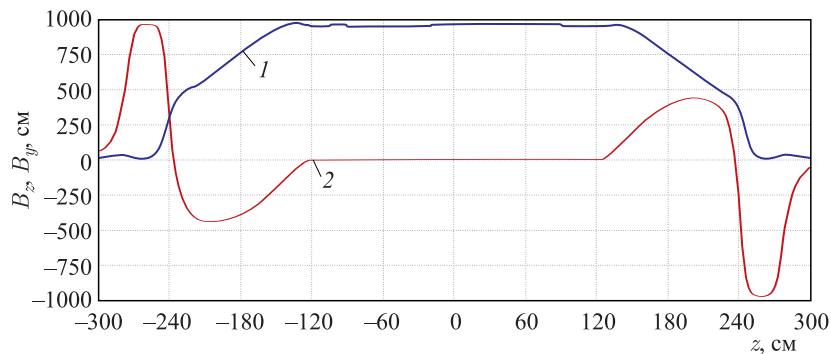


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Продольная (синяя, 1) и вертикальная (красная, 2) компоненты магнитного поля вдоль оси установки

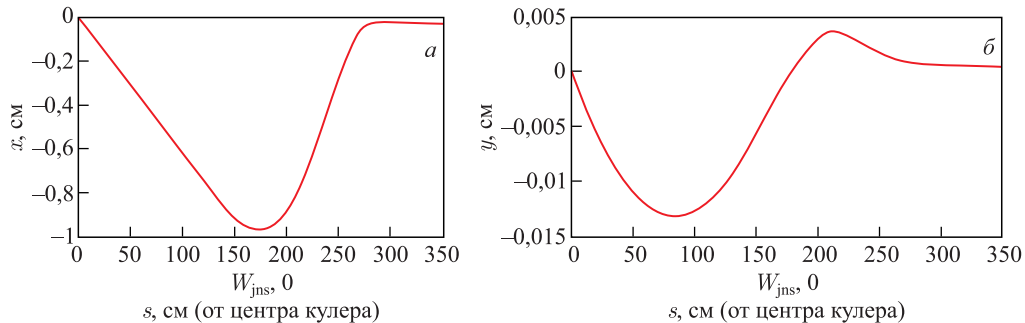


Рис. 3. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) смещение ионного пучка. Нулевая координата — центр соленоида охлаждения

ния, поворотных тороидов и корректирующих диполей. За нулевую координату принята координата центра установки.

Согласно полученным данным эффективная магнитная длина установки по продольному полю составляет 4,31 м. Данная величина необходима для расчетов «оптики» бустера, поскольку соленоидальное поле вносит дополнительную связь.

Вертикальная компонента магнитного поля (красная, 2) формируется полем тороидов и корректирующих диполей таким образом, чтобы скомпенсировать отклонение ионного пучка от оси (рис. 3).

При прохождении магнитной системы установки электронного охлаждения ионный пучок приобретает горизонтальное смещение вследствие взаимодействия с вертикальной компонентой магнитного поля поворотных тороидов. Это смещение необходимо компенсировать, поскольку в противном случае пучок попадет на стенку вакуумной камеры, что приведет к аварии. Для этой цели в состав установки электронного охлаждения включены два дипольных корректора ионной орбиты, которые создают поле, позволяющее скомпенсировать отклонение пучка от орбиты.

Один из вариантов коррекции предусматривает конфигурацию магнитного поля, когда все смещения пучка происходят внутри магнитной системы установки, а на входе и выходе из кольца бустера пучок имеет практически нулевое отклонение. На рис. 3 представлен расчет траектории ионов золота на энергии инжекции (при этом смещение максимально). Расчет ведется от центра соленоида охлаждения. Из рисунка видно, что на выходе из установки ионный пучок имеет практически нулевое смещение относительно оси вакуумной камеры.

## ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Функционально вакуумная камера установки аналогична подобным, использованным на установках LEIR [3], COSY, однако на основе накопленного опыта было произведено несколько изменений конструкции. Добавлены дополнительные pick-up электроды непосредственно вблизи пушки и коллектора, а также дополнительная откачка посредством геттерных насосов с внешней активацией. Суммарно установка имеет три пары насосов: два магниторазрядных, соединенных с камерами тороидов, два титановых сублимацион-

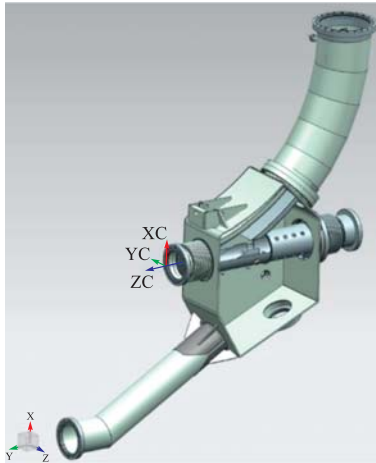


Рис. 4. Разрез участка вакуумной камеры (камера тороидов)

ных непосредственно в камере тороидов и два геттерных в камерах пушки и коллектора.

Электронная пушка практически полностью повторяет пушку, используемую на кулере COSY. Так же, как и предыдущая модель, она оснащена четырехсегментным управляющим электродом, который позволяет формировать электронный пучок с изменяемым профилем [4]. Отличие только в форме верхней части, откуда убран порт для насоса и где изменен диаметр. Коллектор электронов представляет собой компиляцию двух конструкций, используемых на установках LEIR и COSY. Верхняя часть, которая принимает на себя поток электронов, сделана конической, чтобы увеличить поверхность осаждения тока. Охлаждение коллектора осуществляется трансформаторным маслом, нагнетаемым при помощи специально разработанной маслонасосной станции.

## СИСТЕМА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ

Магнитопровод мощного трансформатора изготовлен и собран из анизотропной электротехнической ленты толщиной 0,3 мм марки 3408 по технологии UNICORE.

Поскольку желательно охлаждение трансформатора, а вторичные обмотки находятся под потенциалом основного выпрямителя и должны выдерживать напряжение до 60 кВ, трансформатор погружен в бак с протоком трансформаторного масла (рис. 5).

Высоковольтный терминал находится непосредственно над масляным баком с трансформатором и помещен в экранированный бокс. Внутри терминала размещены элек-

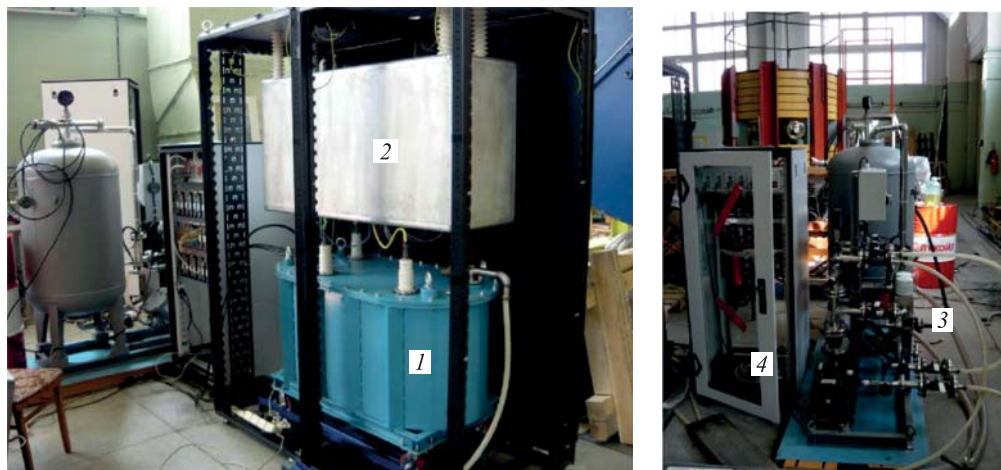


Рис. 5. Высоковольтный источник питания: 1 — силовой трансформатор в масляном баке; 2 — высоковольтный терминал; 3 — система прокачки масла; 4 — стойка УБС

тронные блоки питания и управления пушкой (евромеханика). Снаружи вся конструкция закрывается внешним колпаком, который заземлен. Для удобства эксплуатации и наладки внешний колпак и высоковольтный терминал откатываются в сторону по направляющим.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая степень готовности основных компонентов установки электронного охлаждения позволила надеяться на пуск до конца 2015 г.

Исследования по источникам электронов и катодам для получения электронного пучка выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. // УФН. 2000. Т. 43, № 5. С. 433–452.
2. Buble A. *et al.* Commissioning of the LEIR Electron Cooler with  $Pb^{+54}$  Ions // Proc. of XX Russ. Accel. Conf. (RuPAC2006), Novosibirsk, Russia, Sept. 10–14, 2006.
3. Bocharov V. *et al.* Electron Cooler Commissioning // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 532. P. 144–149.
4. Buble A. *et al.* The Electron Gun with Variable Beam Profile for Optimization of Electron Cooling // Proc. of EPAC 2002, Paris, 2002. P. 1356–1358.