

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ БУСТЕРА NICA

*М. И. Брызгунов^a, А. В. Бублей^a, А. П. Денисов^a, В. В. Пархомчук^a,
В. М. Панасюк^a, В. Б. Рева^{a,б}, А. М. Батраков^a, Т. В. Бедарева^a,
Е. А. Бехтенов^a, А. Д. Гончаров^a, К. М. Горчаков^a, И. А. Гусев^a,
Б. А. Довженко^a, А. А. Жариков^a, Г. В. Карпов^a, В. В. Колмогоров^a,
М. Н. Кондауров^a, В. Я. Корчагин^a, Н. С. Кремнев^a, В. А. Полухин^a,
А. А. Путьмаков^a, Д. В. Сеньков^{a,б}, М. Г. Федотов^{a,б}, В. А. Чекавинский^a*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В последние годы в ИЯФ СО РАН велись работы по созданию системы электронного охлаждения бустера NICA. В данной статье приводятся описание конструкции и результаты испытаний охладителя.

In recent years works on production of a new electron cooling system for NICA booster were performed. Description of the cooler's construction and results of test are presented.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Система электронного охлаждения бустера NICA предназначена для накопления пучка ионов при инжекции и его охлаждения после ускорения до некоторой промежуточной энергии [1]. Данная система разработана и испытана в ИЯФ СО РАН. Максимальная энергия электронного пучка в ней составляет 60 кэВ, что соответствует энергии ионов 110 МэВ/нуклон. В настоящее время ведутся работы по монтажу системы в зале синхрофазотрона на своем штатном месте. В данной работе приводятся результаты испытаний охладителя в ИЯФ СО РАН.

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОХЛАДИТЕЛЯ

Система электронного охлаждения бустера NICA выполнена по классической схеме (рис. 1). Электронный пучок, эмиттированный с катода пушки, ускоряется до рабочей энергии и, пролетая через тороид, попадает в секцию охлаждения, где взаимодействует с ионным пучком. Во втором тороиде пучки разводятся, и электроны направляются в коллектор, где они тормозятся и поглощаются стенками охлаждаемой приемной части. На всем пути электроны двигаются в продольном магнитном поле, что обеспечивает фокусировку пучка, а в секции охлаждения позволяет реализовать метод быстрого (замагниченного) охлаждения. Торможение электронного пучка перед коллектором обеспечивает рекуперацию его энергии и существенно снижает мощность основного высоковольтного источника питания.

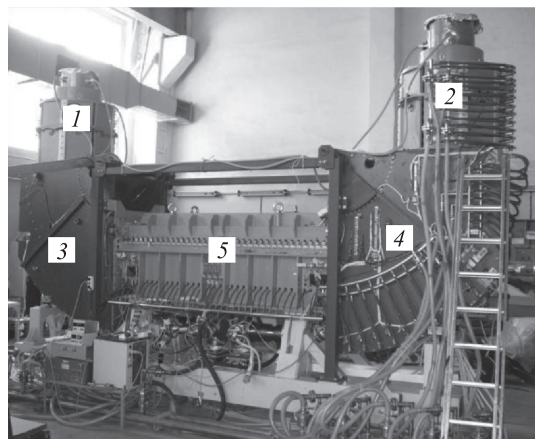


Рис. 1. Электронный охладитель бустера NICA: 1, 2 — соленоиды пушки и коллектора с высоковольтными баками внутри; 3, 4 — тороиды; 5 — секция охлаждения

измерения прямолинейности силовой линии использовалась специально разработанная в ИЯФ СО РАН система, основанная на магнитном компасе [3], с чувствительностью до 10^{-6} рад.

При создании электронной пушки и коллектора (рис. 2) за основу были взяты конструкции, разработанные для высоковольтного охладителя синхротрона COSY [4]. Коллектор состоит из двух частей: охлаждаемого приемного электрода, на который попадает

В тороидах охладителя установлены специальные электростатические пластины, создающие поворотное электрическое поле. В таком случае движение электронов становится обратимым и покинувшие коллектор вторичные электроны могут долететь до пушки, а затем вернуться в коллектор, попасть на его стенки и поглотиться. Данный метод позволяет на несколько порядков повысить эффективность рекуперации [2].

Как и в предыдущих охладителях, созданных в ИЯФ СО РАН, секция охлаждения в данной системе состоит из отдельных катушек, которые можно поворачивать вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Такой подход позволяет настраивать прямолинейность магнитной силовой линии и регулировать наклон каждой катушки отдельно. Для

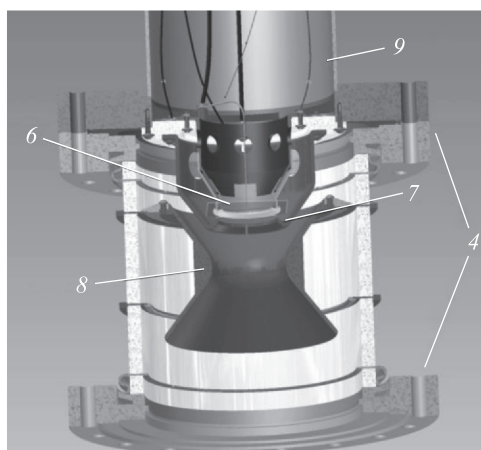
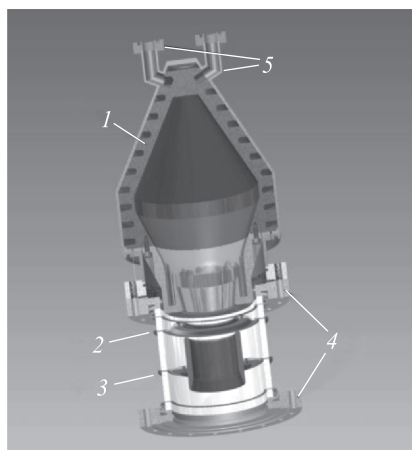


Рис. 2. Коллектор (а) и пушка (б) охладителя бустера NICA: 1 — приемный электрод; 2 — супрессор; 3 — приколлекторный электрод; 4 — вакуумные фланцы; 5 — трубки для охлаждения маслом; 6 — катод в корпусе; 7 — управляющий электрод; 8 — анод; 9 — патрубок с электрическими вводами

электронный поток основного пучка, и керамической вставки, содержащей супрессор и приколлекторный электрод. Супрессор позволяет создать потенциальный электростатический барьер на входе, который запирает вторичные электроны внутри коллектора. Приколлекторный электрод имеет тот же потенциал, что и приемный электрод, и обеспечивает симметрию потенциала в области супрессора. Удержание в коллекторе дополнено магнитной пробкой, запирающей вторичные электроны, движущиеся с большими углами относительно магнитной силовой линии.

Основной особенностью пушки является разрезной четырехсекторный управляющий электрод (см. рис. 2, 7). Такой подход позволяет при помощи пикапов измерять положение не только центра пучка, но и его краев [4].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Вольт-амперная характеристика пушки. На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики пушки. В данном случае напряжение U_{grid} (управляющий электрод) делится на U_{anode} (анод), а ток пучка (I_{coll}) — на $U_{\text{anode}}^{1,5}$. Такое масштабирование позволяет сравнивать кривые, полученные при разных значениях анодного напряжения. При этом все кривые будут совпадать, если пушка работает в режиме ограничения пространственным зарядом пучка (режим 3/2).

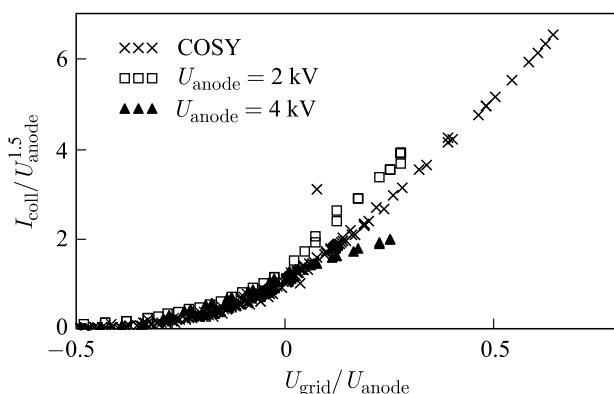


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики пушки охладителя бустера NICA при различных режимах и характеристиках пушки высоковольтного охладителя COSY

Здесь видно, что для разных значений U_{anode} вольт-амперные характеристики совпадают до $U_{\text{grid}} / U_{\text{anode}} \approx 0$. Однако правее кривые расходятся. Данный эффект можно объяснить недостаточной эмиссионной способностью катода при испытаниях в ИЯФ. После активации катода было обнаружено, что эмиссия с его поверхности при стандартном напряжении на нити накала существенно ниже, чем в других пушках подобного типа, использованных нами в других охладителях. Возможно, это связано с производственным браком катода. Поэтому для достижения требуемого эмиссионного тока напряжение накала было увеличено до 20–24 В при номинале 14–16 В. Однако даже после этого измерения показали, что эмиссия с разных мест катода существенно отличается.

При равных значениях U_{grid} ток пучка тем выше, чем выше напряжение на аноде. При $U_{\text{anode}} = 2$ кВ эмиссионной способности катода достаточно, чтобы пушка работала в режиме 3/2. Однако при $U_{\text{anode}} = 4$ кВ необходимая плотность тока становится слишком большой и эмиссии с катода становится недостаточно. В результате мы видим отклонение кривой вниз.

На рис. 3 также показаны вольт-амперные характеристики пушки высоковольтного охладителя COSY. Кривая с охладителя бустера NICA близка к кривой с охладителя COSY (т.е. при таком напряжении анода пушка работает в режиме 3/2), однако она лежит несколько выше. Эта разница может быть связана с небольшими отличиями в конструкциях двух пушек, если электроды в новой пушке расположены ближе к катоду.

2.2. Эффективность рекуперации. На рис. 4 показаны результаты измерения тока потерь в зависимости от напряжения на управляющем электроде при разных значениях напряжения на коллекторе. На рис. 4, *a* поведение всех кривых одинаковое: на начальном этапе повышение U_{grid} (а вместе с ним и тока пучка) приводит к увеличению тока потерь. При достаточно большом токе пучка его пространственный заряд создает дополнительный потенциальный барьер в области супрессорного электрода, который более эффективно запирает вторичные электроны в коллекторе. В результате ток потерь начинает падать. Однако величина тока потерь тем выше, чем выше напряжение коллектора, что связано с уменьшением влияния запирающего пространственного заряда пучка при больших значениях напряжения коллектора.

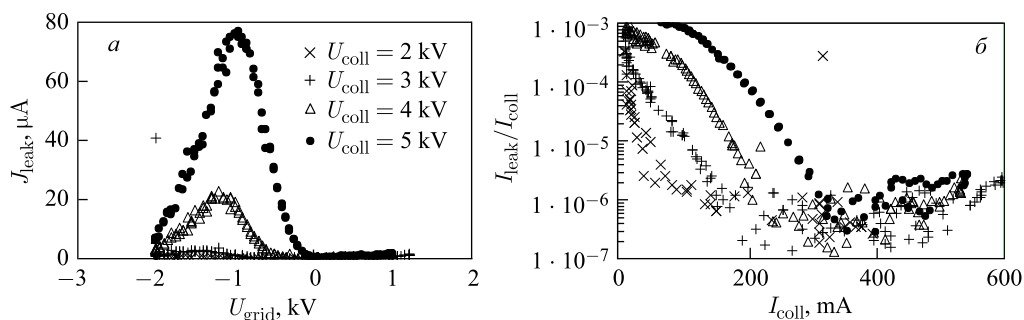


Рис. 4. Зависимость тока потерь от напряжения на управляющем электроде (*a*) и зависимость относительного тока потерь от тока пучка (*b*) при разных значениях напряжения на коллекторе

На рис. 4, *b* показаны зависимости относительного тока потерь (коэффициента рекуперации $I_{\text{leak}}/I_{\text{coll}}$) от тока пучка при тех же измерениях. Как уже говорилось, использование электростатических пластин для поворота позволяет существенно повысить эффективность рекуперации. В данном случае она находится на уровне 10^{-6} при значениях тока в несколько сотен миллиампер.

2.3. Влияние электронного пучка на вакуумные условия. Вакуумные условия в бустере очень важны с точки зрения времени жизни тяжелых высокозарядных ионов при энергии инжекции. Соответственно, электронный пучок не должен сильно ухудшать вакуум в системе. На рис. 5 показаны результаты измерения давления остаточного газа при включении тока электронного пучка. Видно, что при включении тока давление уменьшается. При пролете системы электронный пучок ионизует молекулы остаточного газа.

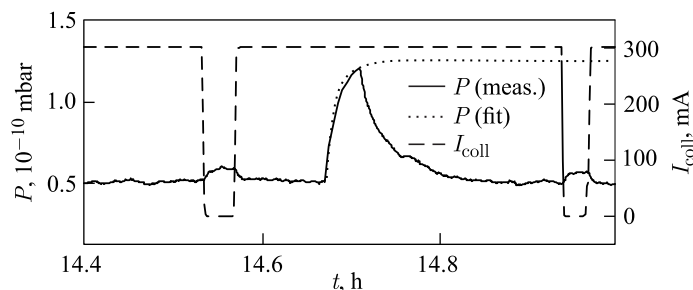


Рис. 5. Изменение давления остаточных газов при включении электронного тока

Образовавшиеся ионы захватываются полем электронного пучка и дрейфуют в сторону пушки или коллектора. Таким образом, электронный пучок увеличивает производительность вакуумной откачки в системе. Для сравнения на рис. 5 в центре показана реакция системы на выключение магнитоэрозийного насоса производительностью 400 л/с.

Если сечение ионизации σ , а длина траектории электронов L , то при токе I производительность вакуумной откачки электронным пучком можно оценить как $I\sigma L/e$. Если остаточный газ состоит только из водорода, сечение его ионизации электроном с энергией 5 кэВ равно $6,5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$. Длина траектории в данном охладителе равна $\sim 6 \text{ м}$. Тогда производительность откачки электронным пучком с током 300 мА равна $\sim 7 \text{ л/с}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на проблемы с катодом, испытания показали работоспособность всех систем охладителя. В данный момент на штатном месте охладителя в ОИЯИ уже закончена сборка его магнитной системы и вакуумной камеры. Проведена настройка продольного магнитного поля в секции охлаждения, и закончен прогрев вакуумной камеры. В 2018 г. планируется закончить сборку охладителя и провести его запуск с электронным пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA. Т.2 / Под ред. И.Н.Мешкова, Г.В.Трубникова. Дубна: ОИЯИ, 2015. 250 с.
2. Bryzgunov M. et al. Recuperation of Electron Beam in the Coolers with Electrostatic Bending // Proc. of COOL 2005, Galena, USA, 2005. P. 341–345.
3. Bocharov V.N. et al. Precision Measurements and Compensation for the Transverse Components of the Solenoids Magnetic Field // Instr. Exp. Tech. 2005. V. 48, No. 6. P. 772–779.
4. Reva V.B. et al. COSY 2 MeV Cooler: Design, Diagnostic and Commissioning // Proc. of IPAC 2014, Dresden, Germany, 2014. P. 777–779.