

*На правах рукописи*

**БУБЛЕЙ Александр Валентинович**

**УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
С ИЗМЕНЯЕМЫМ ПРОФИЛЕМ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2011**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ПАРХОМЧУК  
Василий Васильевич – доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН, Учреждение  
Российской академии наук Институт  
ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН,  
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

САЛИМОВ  
Рустам Абельевич – доктор технических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г.  
Новосибирск.

ЯКОВЕНКО  
Сергей Леонидович – доктор физико-математических наук,  
Объединённый институт ядерных  
исследований, г. Дубна.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – ГНЦ РФ «Институт экспериментальной  
физики», г. Москва.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в  
«\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03  
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И.  
Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения  
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Опыт, накопленный при использовании электронного охлаждения в реальных экспериментах с внутренними мишенями и интенсивными пучками, показал наличие некоторых проблем, ограничивающих светимость таких установок. Наиболее существенной особенностью электронного охлаждения является быстрый рост скорости охлаждения для малых амплитуд отклонения ионов от равновесия. Это связано с тем, что магнитное поле на участке охлаждения «замагничивает» поперечное движение электронов. После ускорения электронов до высокой энергии продольный разброс очень мал и продольная температура в сопутствующей системе координат становится меньше  $1^\circ\text{K}$ . В результате, в большинстве случаев температурой электронного пучка можно пренебречь, и скорость охлаждения растет как куб амплитуды колебаний ионов. Образование сверхплотного охлажденного «ядра» пучка приводило во многих случаях к развитию колебаний и быстрой гибели ионов на больших амплитудах. Это ограничивало накопление пучков и вызывало проблемы фонов в детекторах. Модуляция энергии электронного пучка и, соответственно, возрастание энергетического разброса ионного пучка ухудшало ситуацию.

Развитие новых проектов потребовало разработки систем охлаждения, позволяющих оперативно управлять охлаждением в 6-мерном фазовом пространстве для оптимизации накопления пучков. Для этого была разработана концепция управления не только скоростями электронного пучка, но и плотностью. Уменьшение электронной плотности к центру накопления уменьшает и скорость охлаждения. Так полый электронный пучок будет охлаждать только электроны с амплитудой колебаний, превышающей радиус полой части, что и предотвратит образование слишком высокой плотности ионного пучка. Кроме того, уменьшение электронной плотности в области накопления уменьшает и рекомбинацию ионов и увеличивает время жизни ионов, что позволит накапливать больше ионов.

Тяжелые ионы с большой зарядностью имеют высокие значения сечения взаимодействия с атомами остаточного газа в вакуумной камере. Современные накопительные кольца требуют перехода к вакууму на уровне  $10^{-11}$  –  $10^{-12}$  торр. В установках электронного охлаждения основным источником газоотделения является десорбция под действием потерь электронного пучка в области охлаждения. Для перехода к давлениям  $10^{-11}$  Торр и ниже необходимо уменьшить потери электронного тока до уровня 1 мкА. Для этого предложено использовать электростатические повороты в установках электронного охлаждения. Идея состоит в том, чтобы посредством электрического поля, заставить электроны, отраженные от коллектора, двигаться по той же траектории, что и основной пучок. В этом

случае, совершив какое-то количество колебаний, они будут захватываться в коллектор вместе с электронами основного пучка.

Использование электронного охлаждения на высоких энергиях предъявляет высокие требования на прямолинейность магнитного поля в секции охлаждения. Отклонение от прямолинейности вызывает дополнительное движение электронов в сопутствующей системе и ухудшает охлаждение. Для создания магнитного поля предлагается собирать магнитную систему из отдельных катушек с возможностью пространственной коррекции каждой катушки. Магнитное поле измеряется после сборки соленоида, а отклонения корректируются небольшим вращением, либо наклоном катушек.

### **Цель работы**

Целью настоящей работы являлось:

- Разработка электронной пушки для установок электронного охлаждения.
- Исследования профилей пучка для этого типа пушек и сравнение с расчетными параметрами.
- Разработка и ввод в строй магнитной системы установки электронного охлаждения на базе прецизионного соленоида.
- Разработка электростатической системы для компенсации дрейфа электронного пучка.

### **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автором были произведены измерения параметров установок, изложенные в диссертации. Также автором были проведены некоторые расчеты и моделирование компонентов установок электронного охлаждения, предложены методы их усовершенствования.

### **Научная новизна**

Произведены измерения двумерных профилей электронного пучка пушки с изменяемым профилем пучка при помощи оригинальной методики, изложенной в диссертации.

Достигнуты требуемые параметры магнитной системы на основе прецизионного соленоида.

Достигнута высокая степень рекуперации электронного пучка посредством применения электростатической компенсации дрейфа.

### **Научная и практическая ценность исследований**

Проведенные измерения подтверждают соответствие установок электронного охлаждения, созданных для CSRm, CSRe (Institute of Modern Physics, Ланьчжоу, Китай) и LEIR (CERN, Швейцария) заданным требованиям. Измеренные характеристики электронной пушки, магнитной

системы и электростатического поворота являются основой для определения параметров эксплуатации описываемых установок.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

Применение электронной пушки с изменяемым профилем пучка для установок электронного охлаждения.

Исследование профилей пучка для этого типа пушек с применением оригинальной методики.

Ввод в строй магнитной системы установки электронного охлаждения на базе прецизионного соленоида. Применение комплексной системы магнитных измерений для его тестирования и юстировки.

Ввод в строй системы электростатической компенсации дрейфа электронного пучка на участке поворота.

### **Апробация работы и публикации**

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ОИЯИ (Дубна, Россия), CERN (Женева, Швейцария). Положения диссертации представлялись на российских и международных конференциях и совещаниях, включая: МЕЕС (Дубна, Россия, 1998), XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 2000), ECOOL'99 (Uppsala, Sweden, 1999), EPAC'02 (Paris, France, 2002), COOL-03 (Lake Yamanaka, Japan, 2003), COOL05 (Galena, Illinois, U.S.A, 2005), COOL-07 (Bad Kreuznach, Germany, 2007), Workshop on Beam Cooling and Related topics (Lanzhou, China, 2009).

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 12 наименований, изложении на 67 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и три таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** дается перечень требований, предъявляемых для современных установок электронного охлаждения. Рассматриваются основные проблемы, возникающие при использовании установок электронного охлаждения на тяжелоионных накопительных комплексах.

**Глава 1** посвящена рассмотрению возможности применения полого электронного пучка для решения проблем, возникающих в электронном охлаждении. Дается описание результатов моделирования процессов охлаждения электронными пучками с различным профилем (рис. 1)..

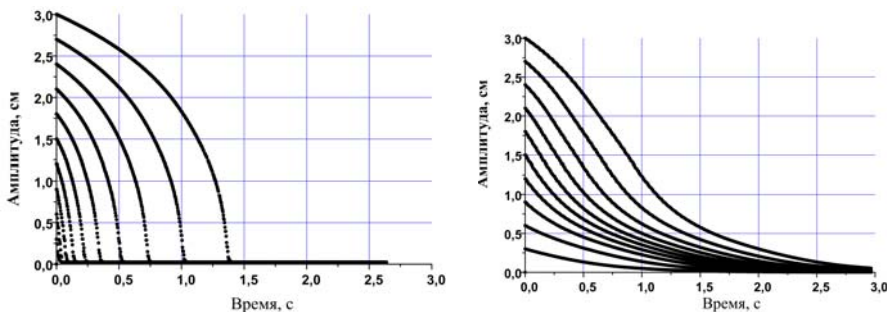


Рис. 1. Амплитуды ионов в процессе охлаждения для сплошного электронного пучка (слева) и полого пучка (справа).

Приводится схема и основные параметры пушки с управляемым профилем электронного пучка. Подробно описывается оборудование и методика измерения двумерных профилей для этой пушки (рис. 2, 3).

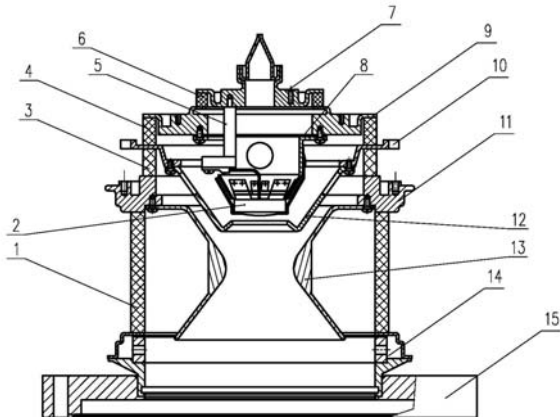


Рис. 2. Схема электронной пушки: 1 – опорный изолятор на 40 кВ; 3, 4, 6 – керамические изоляторы; 2 – катод, 5 – клемма питания накала катода; 7, 9, 10, 11 – медные кольцевые электроды; 8 – держатель катода; 12 – управляющий электрод; 13 – анод; 14 – биметаллическое соединение (медь и нержавеющая сталь); 15 – вакуумный фланец пушки (ДУ 200).

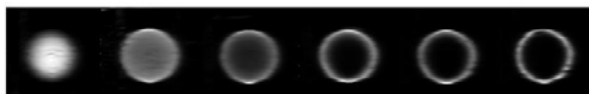


Рис. 3. Распределения плотности электронов при сканировании разных пучков. Напряжение на управляющем электроде пушки  $U_{\text{contr}} = 0, 100, 200, 350, 400$  и  $600$  В (слева направо).

В Главе 2 описана магнитная система установок электронного охлаждения, основой которой является прецизионный соленоид (рис. 4).

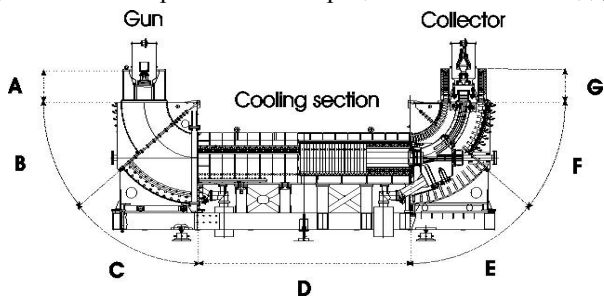


Рис. 4. Схема магнитной системы установки электронного охлаждения для накопительного кольца LEIR (ЦЕРН). А, G – соленоиды пушки и коллектора, В, С, Е, F – сегменты поворотных магнитов (тороидов), D – центральный соленоид (секция охлаждения).

Рассматривается конструкция и параметры узлов магнитной системы, описана методика юстировки катушек секции охлаждения для достижения требуемой однородности магнитного поля. Во второй части главы приводится схема прецизионной системы для измерений поля центрального соленоида и их результаты. Также приводятся результаты измерений магнитного поля в остальных узлах установки и способы коррекции его неоднородностей.

Глава 3 посвящена рассмотрению устройства электростатической компенсации дрейфа. Приведены результаты измерений токов потерь и, соответственно, уровня вакуума в установке (рис. 5, 6).

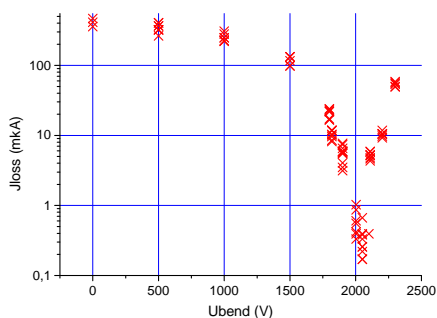


Рис. 5. Измерение тока потерь электронного пучка в зависимости от напряжения на электростатических пластинах.

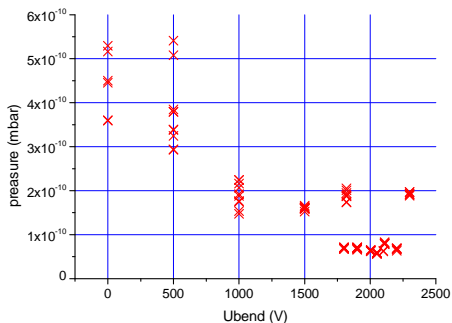


Рис. 6. Улучшение вакуумных условий при переходе от магнитной компенсации дрейфа к электростатической.

В Главе 4 рассматриваются результаты некоторых экспериментов по электронному охлаждению, полученные с помощью описываемых установок (рис. 7).

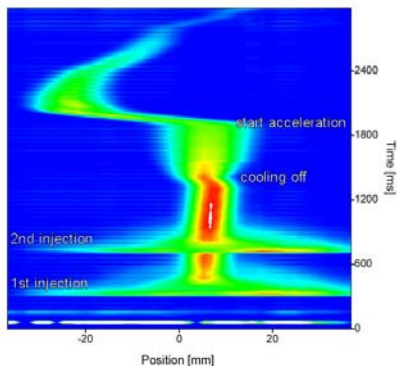


Рис. 7. Измерения поперечного (горизонтального) размера ионного пучка в процессе инжекций и ускорения в LEIR.

### **Основные результаты, полученные в диссертационной работе**

Для установок электронного охлаждения была применена электронная пушка с изменяемым профилем пучка. Проведены испытания этого типа пучков с применением оригинальной методики.

Запущена в строй магнитная система установки электронного охлаждения на базе прецизионного соленоида. Для тестирования и юстировки его применялась специально разработанная комплексная система магнитных измерений.

Введена в строй система электростатической компенсации дрейфа электронного пучка на участке поворота.

### **Основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в следующих работах:**

1. A.V. Bublely, V.V. Parkhomchuk, V.B. Reva. Advantages of cooling with radial varying electron beam density. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 532 (2004) 303-306.
2. A.V. Bublely, V.M. Panasyuk, V.V. Parkhomchuk, V.B. Reva. Measuring a hollow electron beam profile. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 532 (2004) 413-417.
3. V.Bocharov, A. Bublely, et. al., HIRFL-CSR electron cooler commissioning. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 532 (2004) 144-149.



4. E.I. Antokhin, V.N. Bocharov, A.V. Bublei. Conceptual project of an electron cooling system at an energy of electrons of 350keV. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 441 (2000) 87-91.
5. C. Crawford, E. McCrory, S. Nagaitsev, A. Shemyakin, V.Bocharov, A. Bublei, V. Parkhomchuk, V. Tupikov, and S. Seletsky. Fermilab Electron Cooling Project: Field Measurements in the Cooling Section Solenoid. - Proc. 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, p.195-7.
6. Бочаров В.Н., Бублей А.В., Константинов С.Г. и др. Прецизионные измерения и компенсация поперечных компонент магнитного поля соленоидов. // ПТЭ. - 2005. - №6. - С.78-86.
7. Бублей А.В., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Рева В.Б. Измерение профиля интенсивного электронного пучка. // ПТЭ. - 2006. - №1. - С.91-99.
8. A. Bublei, A. Goncharov, A. Ivanov, et. al. The electron gun with variable beam profile for optimization of electron cooling. - Proceeding of EPAC 2002, Paris, France. p.1357-1358.
9. А. В. Бублей, А. В. Иванов, В. М. Панасюк и др. Электронная пушка с управляемым профилем пучка для оптимизации электронного охлаждения ионов. // Вестник НГУ. Серия: физика. 2007. Том 2, выпуск 1. С 65-69.
10. E. Behtenev, V. Bocharov, V. Bublei, et.al. Commission of Electron Cooler EC-300 for HIRFL-CSR. - AIP Conf. Proceed 821 (Galena, Illinois, U.S.A. 2005) p.334.
11. V. Bocharov, M. Brizgunov, A. Bublei, et.al. First Tests of LEIR Cooler at BINP. - AIP Conf. Proceed., 821 (Galena, Illinois, USA, 2005), p.355.

БУБЛЕЙ Александр Валентинович

**Установки электронного охлаждения  
с изменяемым профилем  
электронного пучка**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 20.04. 2011 г.  
Подписано в печать 21.04. 2011 г.  
Формат 60х90 1/16 Объем 0.5 печ.л., 0.4 уч.-издл.  
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 11

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СОРАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*