

**А. В. Бублей, А. В. Иванов, В. М. Панасюк, В. В. Пархомчук,  
В. Б. Рева, Б. Н. Сухина, М. А. Тиунов**

Институт ядерной физики СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: A. V. Ivanov@inp.nsk.su

## **ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА С УПРАВЛЯЕМЫМ ПРОФИЛЕМ ПУЧКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ИОНОВ**

Предложена и реализована конструкция замагниченной четырехэлектродной электронной пушки с пучком, профиль которого регулируется от параболического до полого. Управление профилем осуществляется при помощи изменения потенциала управляющего электрода. Максимальный ток пучка равен 3 А, номинальный – 1 А. Максимальный потенциал катода относительно земли составляет –40 кВ. Пушка погружена в продольное магнитное поле, регулируемое от 0,5 до 2,0 кГс.

В статье приведены рассчитанные и измеренные вольтамперные характеристики пушки, профили пучка при различных потенциалах управляющего электрода. Приведены данные о первых успешных экспериментах по охлаждению ионов в накопителе LEIR полым электронным пучком.

### **Введение**

Метод электронного охлаждения используется для уменьшения эмиттанса ионных пучков в ускорителях-накопителях [1]. Этот метод основан на использовании электронного пучка, который движется совместно с охлаждаемым ионным пучком на прямолинейном участке орбиты со скоростью, равной скорости ионов. Кулоновское взаимодействие электронов и ионов в процессе совместного движения приводит к уменьшению энергии хаотического движения ионов.

На некоторых установках, однако, наблюдается возникновение сильных потерь в интенсивном ионном пучке на начальных стадиях охлаждения [2]. Это явление, получившее наименование «электронный нагрев», ограничивает ионный ток, накапливаемый в кольце. Была выдвинута гипотеза, что при охлаждении может происходить возбуждение когерентных колебаний плотного охлажденного ядра ионного пучка, приводящее к потере части ионов.

Для уменьшения этого эффекта было предложено использовать для охлаждения полый электронный пучок [3]. Использование полого пучка предотвратит образование плотного ядра ионного пучка, при этом общее время охлаждения возрастет незначительно. Уменьшение плотности тока электронов в центральной части, где накапливаются охлажденные ионы, позволит к тому

же резко уменьшить рекомбинационные потери. С другой стороны, в экспериментах может быть полезно оперативное переключение на однородный пучок для достижения максимальной степени охлаждения. Дополнительным требованием, предъявляемым к электронному пучку, является его низкая (менее 0,1эВ) поперечная температура.

### **Электронная пушка**

Геометрия электронной пушки, которая обеспечивает управляемый профиль пучка, показана на рис. 1. Цифрами обозначены: 1 – катод, 2 – экранирующий электрод, 3 – управляющий электрод, 4 – анод, 5 – выходной электрод (фактически является вторым анодом, находится под потенциалом земли). Пушка погружена в продольное магнитное поле величиной от 0,5 до 2,0 кГс (поле Бриллюэна ~ 50 Гс, т. е. пучок сильно замагничен). Используется выпуклый оксидный катод диаметром 30 мм. Потенциал катода относительно выходного электрода может достигать –40 кВ, максимальный потенциал анода относительно катода – 8 кВ. Управление профилем пучка осуществляется при помощи изменения потенциала управляющего электрода в диапазоне  $\pm 2$  кВ относительно катода. Поскольку этот электрод расположен вблизи края катода, он сильно влияет на плотность тока из этой области. Потенциал эк-

ранирующего электрода равен потенциалу катода, его задачей является ограничение тока с самого края катода.

### Измерение профиля электронного пучка

Для измерения профиля электронного пучка использовалась тонкая вольфрамовая проволока диаметром 20 мкм. Измерялся ток, оседающий на проволоку при ее движении поперек пучка, по нему восстанавливался профиль пучка. Рассчитанные программой UltraSAM [4] и измеренные профили пучка в зависимости от потенциала управляющего электрода представлены на рис. 2. Эксперимент проводился на стенде при уменьшенных токах пучка с сохранением степени его замагниченности.

Распределение плотности тока пучка было также подтверждено путем регистрации излучения света, которое появляется при нагреве проволоки пучком. Профили электронного пучка, полученные этим методом, показаны на рис. 3.

### Измерение вольтамперной характеристики пушки

Сравнение рассчитанного при помощи программы UltraSAM и измеренного первенса пушки показано на рис. 4. Как видно, с ростом потенциала управляющего электрода до некоторой величины, определяемой потенциалом катода, выходной ток увеличивается, но далее происходит образование виртуального катода. Управляющий электрод вытягивает настолько большой ток, что

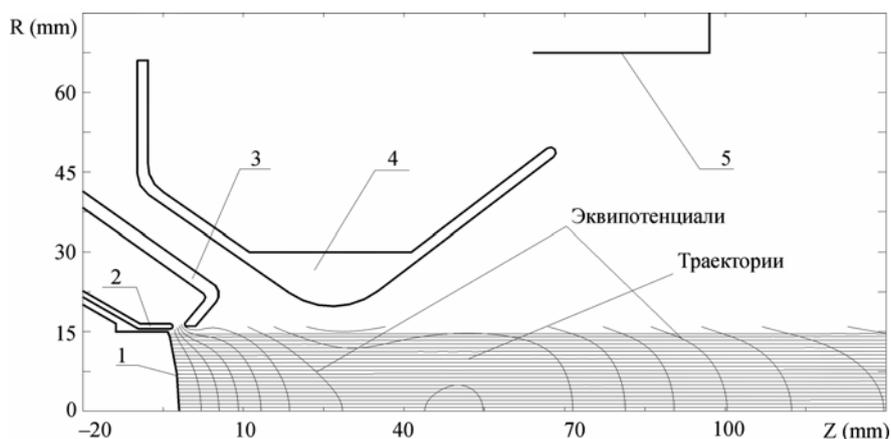


Рис. 1. Геометрия электронной пушки с управляемым профилем пучка

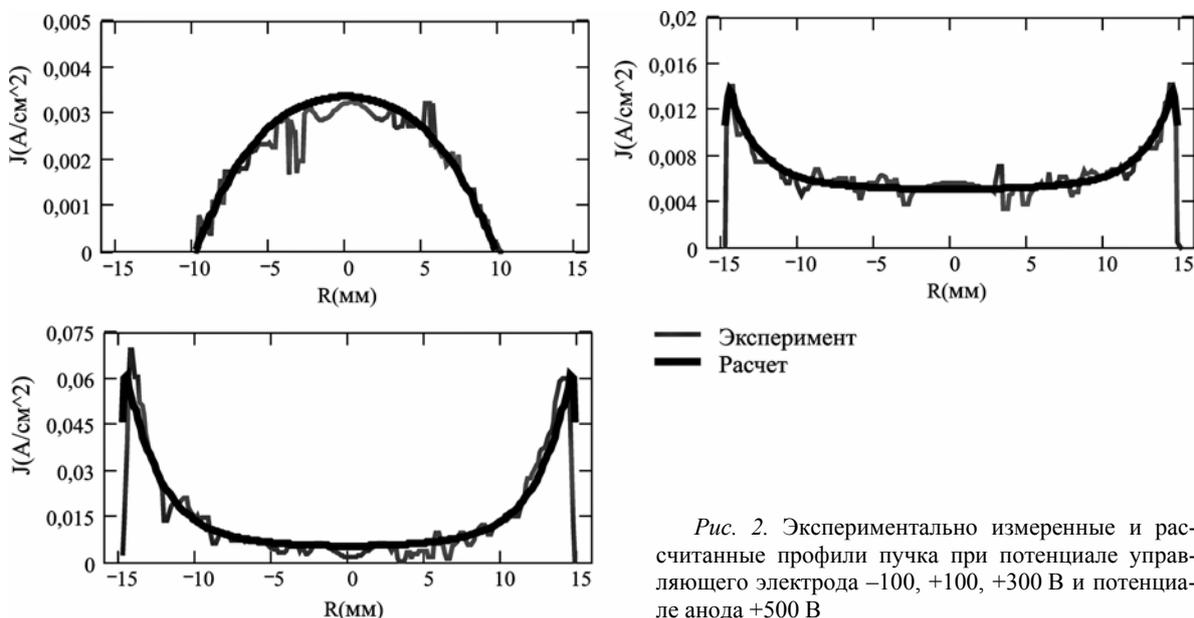


Рис. 2. Экспериментально измеренные и рассчитанные профили пучка при потенциале управляющего электрода  $-100$ ,  $+100$ ,  $+300$  В и потенциале анода  $+500$  В

из-за провисания потенциала центральная часть пучка отражается назад (рис. 5). При дальнейшем увеличении потенциала управляющего электрода выходной ток пушки остается постоянным. Хотя в режиме виртуального катода выходной пучок и имеет идеально полый профиль, сильные шумы такого пучка исключают его использование для электронного охлаждения.

Из приведенных выше рисунков видно, что первеанс пушки, так же как и профиль пучка, определяется отношением  $U_{упр} / U_{анод}$ . Если это отношение больше единицы, то плотность тока в центре пучка много меньше плотности на краю (приближение полого пучка). Варьируя эти два потенциала, можно получить пучок с заданным током и профилем. Так, для получения почти полого пучка с током 1 А (номинальный режим для упомянутых ниже охладителей) можно выбрать  $U_{упр} = 1,4$  кВ,  $U_{анод} = 1,2$  кВ при  $U_{кат}$  не менее  $-5$  кВ. Поперечная ларморовская температура пучка при этом составляет менее 0,05 эВ. Максимальный же экспериментально полученный ток пушки составляет 3 А.

### Электронные охладители с пушкой с управляемым профилем

Электронные пушки с управляемым профилем пучка были установлены на изготовленные в ИЯФ установки электронного охлаждения ЭХ-35 и ЭХ-300, предназначенные для строящихся колец CSRm и CSRe (IMP, Китай), а также на установку электронного охлаждения для кольца LEIR (CERN, Швейцария). Эксперименты по охлаждению пучка ионов  $Pb^{+54}$ , проведенные на охладителе LEIR, показали [5], что накапливаемый ионный пучок увеличивается с  $0,7 \times 10^9$  до  $1,3 \times 10^9$  частиц при переходе от параболического профиля электронного пучка к полому при одинаковом (0,1 А) его токе. Время жизни накопленного пучка при этом после остановки инжекции увеличивается с 6 до 12 с.

### Заключение

Была разработана высокопереванская электронная пушка с управляемым профилем пучка. Изменение профиля от параболического до полого осуществляется при помощи потенциала управляющего электрода. Номинальный ток пушки составляет 1 А, максимальный – 3 А. Испытания пушки на стенде показали отличное сов-



Рис. 3. Профили пучка при потенциале управляющего электрода 0, +100, +300 В и потенциале анода +500 В

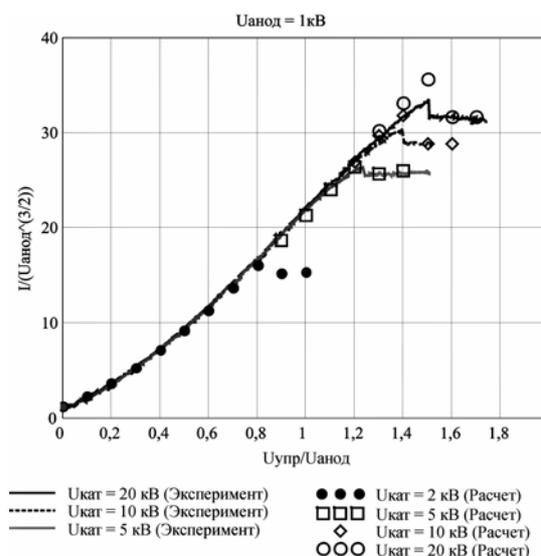


Рис. 4. Вольтамперная характеристика пушки

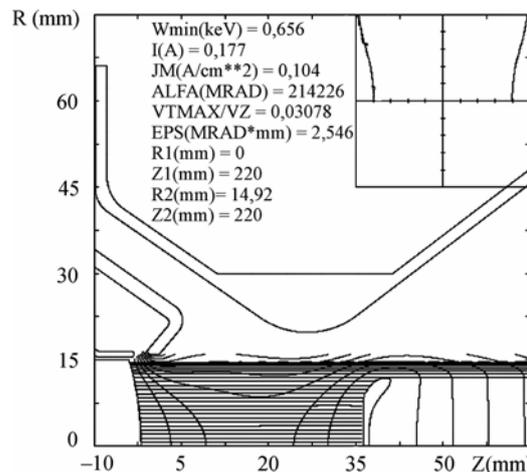


Рис. 5. Траектории электронного пучка и эквипотенциали в режиме виртуального катода, параметры пучка в сечении

падение рассчитанных и измеренных ее характеристик. Первые эксперименты по охлаждению ионного пучка на кольце LEIR подтвердили эффективность использования полых электронных пучков.

**Список литературы**

1. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение – 35 лет развития // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170, № 5. С. 473–493.

2. Meshkov I., Sidorin A., Syresin E. Intensive ion beam in storage rings with electron cooling // Proc. RuPAC. Dubna, Russia. 2004. P. 13–17.

3. Bublei A. V., Parkhomchuk V. V., Reva V. B. Advantages of electron cooling with radially varying electron beam density //

Nucl. Instr. and Meth. A 532. 2004. P. 303–306.

4. Ivanov A. V., Tiunov M. A. ULTRASAM-2D Code for Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision // Proc. EPAC 2002. P., 2002. P. 1634–1636.

5. Bublei A., Parkhomchuk V., Reva V. et al. Commissioning of the LEIR electron cooler with  $Pb^{+54}$  ions // Proc. RuPAC 2006. Novosibirsk, 2006.

*Материал поступил в редколлегию 23.11.2006*