

МАЛОРАЗМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*А. П. Денисов¹, М. И. Брызгунов, А. В. Иванов,
В. В. Пархомчук, А. А. Путьмаков, В. Б. Рева*

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

Одним из способов повышения эффективности электронного охлаждения является повышение плотности электронов в системе отсчета пучка. Как правило, с увеличением энергии охлаждаемого пучка ионов уменьшают его размер, следовательно, можно увеличить плотность электронного тока, уменьшив диаметр пучка электронов и сохранив его полный ток. В работе описаны два варианта электронной пушки для высоковольтных систем электронного охлаждения с плоским и выпуклым катодами, в каждом из которых электронная пушка способна произвести пучок диаметром до 1 см и с током порядка 1 А.

One way to increase efficiency of the electron cooling is to increase the electron density in the reference frame of an electron beam. In most cases, the higher energy of ion beams the less its size, so one can reduce the diameter of the electron beam preserving the total current and increasing the current density. This paper discusses two electron gun designs for high-voltage electron cooling systems: the electron gun with flat cathode and the gun with convex one. Each gun is able to produce an electron beam with diameter up to 1 cm and current about 1 A.

PACS: 29.20.-c; 29.25.Bx; 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

Системы электронного охлаждения (СЭО) используются в ионных циклических ускорителях с целью повышения качества проводимых экспериментов с ионными пучками, а именно для уменьшения разброса по импульсам в ионных пучках, или, как это принято называть, для охлаждения пучка ионов [1]. В первую очередь, охлаждение необходимо для повышения времени жизни ионного пучка за счет компенсации различных эффектов нагрева, таких как нелинейности в оптике ионного кольца, внутривидовое рассеяние, рассеяние на внутренней мишени и столкновение пучков [2]. В процессе охлаждения энергия ионов приближается к энергии равновесной частицы, а траектории их движения стягиваются к орбите пучка. Как следствие, происходит уменьшение размера ионного пучка, что может быть использовано в экспериментах по столкновению пучков как способ повышения светимости [3]. Всего в мире было построено около 20 электронных

¹E-mail: A.P.Denisov@inp.nsk.su

охлаждателей частиц [4]. В качестве примеров действующих установок можно привести охладитель для синхротрона COSY (Research Center Jülich, Германия) с энергией электронного пучка до 2 МэВ, СЭО для кольца LEIR комплекса LHC в ЦЕРН, два охладителя для HIRFL-CSR (IMP, Китай) и три установки охлаждения для SIS18, ESR и CRYRING (GSI, Германия).

Общий принцип работы СЭО заключается в совмещении охлаждаемого ионного пучка с пучком электронов, так чтобы на участке охлаждения оба пучка двигались соосно и с одинаковыми средними скоростями [1, 5]. Отклонение импульса ионов от импульса равновесной частицы в лабораторной системе отсчета (СО) выражается в виде теплового движения ионов в системе отсчета пучка. Это же верно и для электронов. За счет кулоновских столкновений происходит релаксация температур электронного и ионного пучков, что приводит к уменьшению разброса импульсов у ионов. После установления теплового равновесия угловой разброс в ионном пучке будет много меньше углового разброса в пучке электронов, что обуславливается значительным отличием масс электронов и ионов [1, 5]: $\Delta\theta_i/\Delta\theta_e \sim \sqrt{m_e/m_i} \ll 1$. Скорость охлаждения и минимальная температура, до которой возможно охладить пучок ионов, обуславливается характеристиками пучка электронов (ток, энергия, форма распределения электронов в пучке) и параметрами оптики в установке электронного охлаждения, а также зависит от оптики самого ионного пучка. Декремент охлаждения (в лабораторной системе отсчета), описывающий характерное время уменьшения разброса по импульсам в ионном пучке, выраженный из полуэмпирической формулы В. В. Пархомчука [1], можно представить в следующем виде:

$$\lambda_c = \tau_c^{-1} \propto \frac{-1}{\gamma^2} \frac{n_e}{[\delta p_{\perp}^2 + \delta p_{\parallel}^2/\gamma^2 + (m_i v_{\text{eff}})^2]^{3/2}}. \quad (1)$$

Здесь n_e — плотность электронов; δp_{\perp} — поперечная скорость ионов; δp_{\parallel} — отклонение продольной компоненты импульса от импульса равновесной частицы; v_{eff} — эффективная скорость электронов; γ — релятивистский γ -фактор; m_i — масса иона.

Одним из определяющих элементов оптики электронного пучка является электронная пушка. Именно в пушке, на этапе получения пучка, когда электроны имеют низкую энергию, различные неоднородности ускоряющих электрических полей оказывают наиболее сильное влияние на температуру электронов.

В данной работе описаны два варианта электронной пушки для будущей установки электронного охлаждения с энергией до 2,5 МэВ для коллайдера ускорительного комплекса NICA, строящегося в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна). Электронные пушки предыдущих СЭО, произведенных в ИЯФ СО РАН (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера) [6–8], создавались для получения широкого электронного пучка диаметром до 3 см и током до 1 А. В коллайдере NICA требуется электронный пучок с большей плотностью. Этого можно достичь, уменьшая диаметр электронного пучка, не меняя при этом его полного тока. Поперечный размер охлаждаемого ионного пучка составляет примерно 0,8 см ($\sigma \approx 0,4$ см), и для эффективного охлаждения электронный пучок должен полностью покрывать пучок ионов. В связи с этим для высоковольтного охладителя разработаны два новых варианта электронной пушки с меньшим катодом диаметром в 1 см.

Тепловая температура электронов и когерентные колебания электронов в пучке. На выходе из катода электроны имеют температуру, близкую к температуре катода. Характерное ее значение для электронных пушек, используемых в электронных охладителях,

составляет примерно 1000 К, что соответствует 0,1 эВ. Тепловое движение частиц не может быть подавлено посредством применения каких-либо комбинаций внешних электромагнитных полей, не зависящих от движения частиц, поэтому вклад в температуру от данного движения считается минимально возможной температурой электронного пучка. Стоит отметить, что тепловую температуру электронов возможно уменьшить при помощи адиабатического расширения пучка. Однако в этом случае уменьшается плотность тока электронов, а вместе с ней и эффективность охлаждения ионов, поэтому данный способ уменьшения температуры нами не рассматривается.

Помимо теплового движения электронов, также имеют место когерентные колебания частиц в пучке, вызванные неоднородностью электрических и магнитных полей на пути электронного пучка. В отличие от теплового движения данные колебания можно компенсировать правильным выбором полей корректоров транспортного канала электронного пучка. Однако существует ряд трудностей и ограничений, связанных с уменьшением энергии когерентных колебаний электронов. Основным фактором выступает явление, связанное с потерей когерентности движения электронов. Из-за пространственного заряда энергия электронов на краю и в центре пучка неодинакова, а следовательно, при прохождении большого расстояния фазы осцилляций будут отличаться, что затруднит последующую коррекцию поперечного движения. Помимо этого, различные нелинейности возмущающих полей на пути электронного пучка также приводят к потере когерентности колебаний частиц. Принимая это во внимание, можно заключить, что наиболее оптимальным вариантом создания холодного электронного пучка является подбор правильной комбинации электрических и магнитных полей в области электронной пушки, где энергия пучка минимальна.

Электронные пушки. К электронным пушкам для СЭО предъявляются повышенные требования по качеству электронного пучка, а именно к величине когерентных колебаний электронов на выходе из пушки [9]. Для электронного охлаждения пучок должен быть непрерывным и иметь большую плотность тока (в экспериментах на СЭО для COSY для того чтобы время охлаждения электронным пучком с энергией 1 МэВ было порядка нескольких десятков секунд, плотность тока электронов должна быть примерно 0,3 А/см²). Распределение плотности тока в пучке должно быть варьировуемым [10]. Помимо этого, каждое такое устройство должно позволять модулировать ток электронов (необходимо для дальнейшего отслеживания положения электронного пучка).

Большинство электронных пушек для современных электронных охладителей, производимых в ИЯФ СО РАН, имеют схожие конструкции [6, 7]. Их концептуальная схема представлена на рис. 1. Пушка находится в продольном магнитном поле порядка 1 кГс, необходимом для фокусировки электронного пучка, что позволяет предотвратить разлет частиц, а также подавить эффект нагрева пучка из-за неоднородностей электрического поля вблизи катода. Чем больше продольное магнитное поле, тем сложнее возбудить поперечное движение у электронов пучка, следовательно, меньше энергия когерентных колебаний пучка на выходе из катода [11]. Исходя из описанных выше требований электронные пушки для СЭО, разрабатываемые в ИЯФ, имеют дополнительные управляющие электроды специальной формы, при помощи которых можно контролировать величину эмиссии с катода, регулируя тем самым ток, а также форму пучка. Геометрия дополнительных электродов, однако, не универсальна и подбирается таким образом, чтобы в некотором диапазоне рабочих параметров минимизировать энергию когерентных колебаний электронов на выходе из пушки.

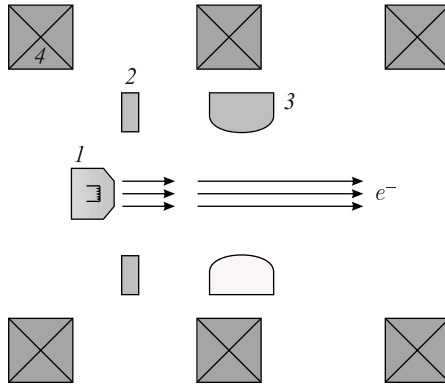


Рис. 1. Концептуальная схема электронной пушки для СЭО: 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод; 4 — катушки продольного магнитного поля для фокусировки электронного пучка

Стоит отметить, что для высоковольтных СЭО существует ряд факторов, накладывающих дополнительные ограничения на параметры электронной пушки, что усложняет соблюдение описанных выше требований. В качестве основного ограничения выступает затрудненный подвод мощности к пушке, находящейся под высоким потенциалом. В частности, это ограничивает мощность катушек продольного магнитного поля, что обуславливает ограничение на максимальную величину магнитного поля, равную примерно 1 кГс. Поэтому основную роль в формировании холодного электронного пучка играют форма электродов пушки и создаваемых ими электрических полей.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА СЭО ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Согласно (1), с ростом энергии охлаждаемого ионного пучка декремент охлаждения уменьшается, что, в свою очередь, можно компенсировать увеличением плотности тока электронов. В охладителе для коллайдера NICA с энергией ионов до 4,5 ГэВ/нуклон планируется оперировать электронным пучком с плотностью порядка 1 A/cm^2 (вдвое больше, чем было заложено в проектных параметрах охладителя для COSY [12]). Необходимый диаметр электронного пучка составляет примерно 1 см. Большинство электронных пушек для СЭО, произведенных в ИЯФ СО РАН, спроектированы для работы с более широкими пучками электронов и с заметно меньшей электронной плотностью пучка. Поэтому для СЭО коллайдера NICA разрабатывается новая электронная пушка, оптимизированная под новые параметры электронного пучка.

В данной работе рассматриваются два варианта электронной пушки. Первый вариант — это пушка с плоским катодом, имеющим прикатодный электрод, аналогичный электроду пушки Пирса с параллельным пучком. Особенностью оптики Пирса является то, что силовые линии электрического поля в области катода направлены параллельно, соответственно, у электронов при эмиссии и первичном ускорении на участке катод–анод отсутствует поперечная компонента скорости. Второй вариант базируется на существующих решениях, в которых используется выпуклый катод для увеличения площади эмис-

сии и, соответственно, тока электронного пучка (подобная пушка установлена в СЭО для COSY). Так как силовые линии электрического поля входят в поверхность катода по нормали, электроны на выходе выпуклого катода всегда имеют ненулевую поперечную скорость. Однако такой катод обладает большей площадью эмиссии, что позволяет получать больший ток при меньших значениях напряженности электрического поля. Это, в свою очередь, позволяет избегать некоторых технических трудностей при проектировании электродов пушки.

Проектные параметры электронного пучка. В экспериментах на COSY при охлаждении пучков с высокой энергией было замечено [9], что чем меньше амплитуда когерентных колебаний электронного пучка, тем выше скорость охлаждения, и, как было отмечено, величину этих колебаний необходимо минимизировать на этапе генерации пучка — в электронной пушке. Однако при проектировании пушки нижняя граница величины когерентных колебаний, которой стараются достичь, определяется точностью, с которой величину этого когерентного движения можно измерить при помощи косвенных методов. В случае СЭО, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН, величина колебаний пучка оценивается из анализа измерений размера пучка при помощи электростатических датчиков положения. Электроны, определяющие границу пучка, совершают ларморовские осцилляции в магнитном поле, при этом размер пучка изменяется на удвоенную амплитуду этих осцилляций. При величине продольного поля, равной 1000 Гс, и энергии когерентных колебаний 1 эВ величина поперечных осцилляций составляет ~ 30 мкм. Чувствительность датчиков положения, используемых, например, в СЭО для COSY, составляет около $\sim 10\text{--}30$ мкм, что и накладывает ограничение на то, насколько амплитуду когерентных колебаний можно минимизировать подстройкой корректоров в электронном охладителе.

Список проектных параметров электронной пушки СЭО для коллайдера NICA

Параметр	Значение
Диаметр электронного пучка, см	1
Ток электронного пучка, А	До 1
Энергия электронов на выходе из пушки, кэВ	До 20
Средняя энергия когерентных колебаний электронов, эВ	Не более 1–2
Магнитное поле, кГс	До 1

Выбор диаметра катода производится исходя из следующих принципов. Для увеличения эффективности охлаждения, согласно (1), необходим пучок с большой плотностью тока, который можно получить, уменьшив диаметр катода. С другой стороны, результирующий электронный пучок должен полностью покрывать охлаждаемый пучок ионов. В противном случае часть ионного пучка, находящаяся вне пучка электронов, будет охлаждаться медленнее. Размер ионного пучка, закладываемого в проектные параметры коллайдера NICA, составляет примерно 8 мм в диаметре. Поэтому в СЭО планируется оперировать электронным пучком диаметром 1 см. Другие параметры электронной пушки для СЭО представлены в таблице.

Пушка с плоским катодом. На рис. 2 представлена схема электродов электронной пушки с плоским катодом. Основная идея связана с пушкой Пирса для получения параллельного пучка, в которой прикатодный электрод находится под углом $67,5^\circ$ к плоскости катода. Удаленный на большое расстояние от катода анод является практически

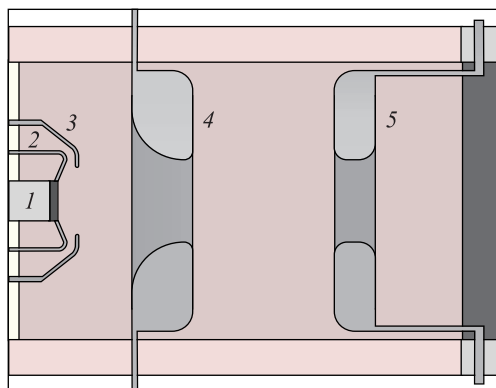


Рис. 2. Схема электронной пушки с плоским катодом: 1 — катод; 2 — экранирующий электрод; 3 — управляющий электрод; 4 — анод; 5 — электрод задания энергии пучка на выходе из пушки

плоским электродом, расположенным параллельно катоду. Остальные промежуточные электроды располагаются вдоль эквипотенциалей и имеют соответствующее напряжение. Отличия рассматриваемой электронной пушки от пушки Пирса обуславливаются жесткими ограничениями на ее размер, максимальную напряженность электрического поля и минимально допустимое расстояние между пучком и электродами. В конструкцию электронной пушки также вводится дополнительный электрод, располагающийся после анода. Так как пушка находится в продольном магнитном поле, движение электронов в пушке при некотором выборе потенциалов электродов и значении продольного магнитного поля может быть резонансным [13]. Дополнительный электрод после анода позволяет дополнительно ускорить или затормозить пучок, задавая тем самым его полную энергию на выходе пушки. В этом случае возможно разделить задачи получения холодного пучка и обеспечения фиксированной энергии на выходе пушки и подбирать напряжения между катодом и анодом, ориентируясь только на минимизацию температуры электронов.

Оптимизация геометрии производилась поэтапно. При фиксированной энергии пучка на выходе (10 кэВ) для пушки без промежуточных электродов производился выбор формы и положения анода и напряжения катод–анод, при которых достигалась минимальная температура пучка при проектном значении тока (1 А). Далее с учетом поля пучка выбиралась эквипотенциаль недалеко от катода, вдоль которой размещался управляющий электрод, находящийся под соответствующим потенциалом. Подобное введение дополнительного электрода не меняет распределение электрического поля и, следовательно, не влияет на движение пучка. В заключение поперечный размер прикатодного и управляющего электродов ограничивался, и вносились финальные поправки в их геометрию с целью минимизации температуры.

Пушка с выпуклым катодом. При примерно равных размерах эмитируемого пучка у выпуклых катодов площадь эмиссии больше, чем у плоских, соответственно, для получения пучка с одинаковым током в пушках с выпуклым катодом требуется меньшая напряженность электрического поля у эмитирующей поверхности. Для компактных электронных пушек величина напряжений на электродах является значимым параметром, поэтому чем меньше требуемая напряженность поля, тем больше свободы в варьировании геометрии электродов.

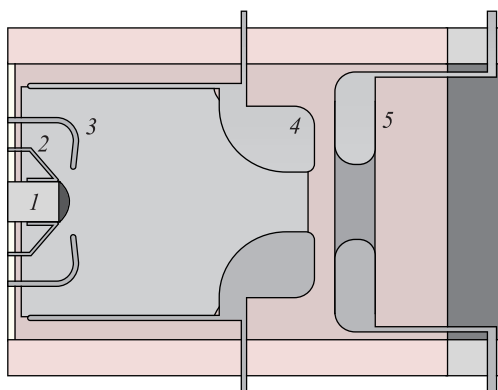


Рис. 3. Схема электронной пушки с выпуклым катодом: 1 — катод, 2 — экранирующий электрод; 3 — управляющий электрод; 4 — анод; 5 — электрод задания энергии пучка на выходе из пушки

За основу рассматриваемого варианта пушки с выпуклым катодом (рис. 3) взята пушка электронного охладителя для COSY [8], а также электронная пушка охладителя для Recycler (Fermilab, США) [14]. Оптимизация геометрии производилась поэтапно, аналогично тому же для пушки с плоским катодом.

Четырехсекторный управляющий электрод. Управляющий электрод электронной пушки разделен на четыре независимых сегмента, напряжение на каждом из которых может быть модулировано (рис. 4). Модуляция электронной плотности необходима для измерения поперечных координат пучка при помощи электростатических датчиков положения (ВРМ) [15]. В СЭО, производимых в ИЯФ СО РАН, используются именно электростатические датчики, что обусловлено простотой их использования и тем, что проводимая с их помощью диагностика является неразрушающей. Возможность модулировать сигнал на каждом секторе управляющего электрода независимо позволяет полу-

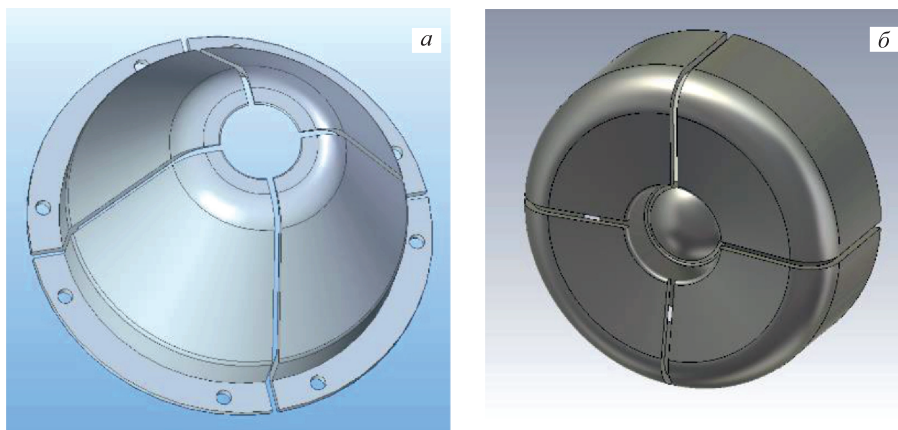


Рис. 4. Трехмерная модель четырехсекторного управляющего электрода: а) для пушки с плоским катодом; б) для пушки с выпуклым катодом

чать информацию о положении каждого из четырех секторов пучка и, соответственно, о его размере. Более того, при наличии нескольких датчиков положения можно измерить поворот пучка вдоль своей оси в скрещенных полях (продольное магнитное поле и собственное электрическое поле пучка) [16].

При единовременной модуляции напряжения на этих электродах с амплитудой, достаточной для создания запирающего потенциала в области катода, возможно получить импульсный электронный пучок, что может быть полезно при измерении профиля пучка контактными методами или, например, при проведении пучка через транспортный канал охладителя, когда электроны могут теряться на стенках вакуумной камеры и необходимо минимизировать ток потерь.

РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

В данном разделе приведены результаты численных расчетов характеристик электронных пушек с плоским и выпуклым катодами с оптимизированной геометрией электродов. Наибольший интерес представляют зависимости температуры пучка от магнитного поля и от величины эмиссии, распределение по величине поперечных скоростей электронов в пучке, а также вольтамперные характеристики пушек. Расчеты производились в специализированной программе Ultra-SAM, разработанной в ИЯФ СО РАН [17].

Величина продольного магнитного поля в пушке выбирается близкой к величине поля в секции охлаждения СЭО и составляет от 700 до 1000 Гс. Динамика пучка в предельных случаях нулевого и бесконечно большого магнитного поля хорошо известна. В первом случае пучок после вылета с катода набирает поперечный импульс за счет поперечных полей от электродов и от собственного пространственного заряда, вследствие чего его поперечная температура непрерывно растет. В случае бесконечно большого продольного поля движение электронов происходит вдоль силовых линий, и, полагая, что все силовые линии направлены параллельно, температуру пучка имеем нулевой. Для реально достижимых значений магнитного поля для высоковольтных СЭО в области электронной пушки (до 1 кГс) динамика электронного пучка может сильно зависеть от комбинации значений продольного магнитного поля и электрических полей электродов пушки.

На рис. 5, *а* представлена зависимость температуры пучка от координаты вдоль оси электронной пушки с плоским катодом. Видно, что чем больше магнитное поле, тем ниже итоговая температура пучка. Поведение температуры пучка при прохождении анода, расположенного на расстоянии 35 мм от катода, указывает на то, что фаза осцилляций электронов также сказывается на результирующей температуре. Если при прохождении анодной линзы радиальная скорость электрона и радиальная сила, действующая на него со стороны электрического поля, в основном противоположны по знаку, то амплитуда осцилляций электрона в магнитном поле уменьшается. Верно и обратное, амплитуда осцилляций частицы может увеличиться, если знаки радиальной скорости и силы совпадают. В однородном магнитном поле фазы осцилляций электронов пучка практически равны, поэтому в зависимости от этой фазы при прохождении анода может происходить нагрев всего пучка или его охлаждение, что можно наблюдать на рис. 5, *а*. Аналогичные зависимости температуры от магнитного поля для электронной пушки с выпуклым катодом представлены на рис. 5, *б*.

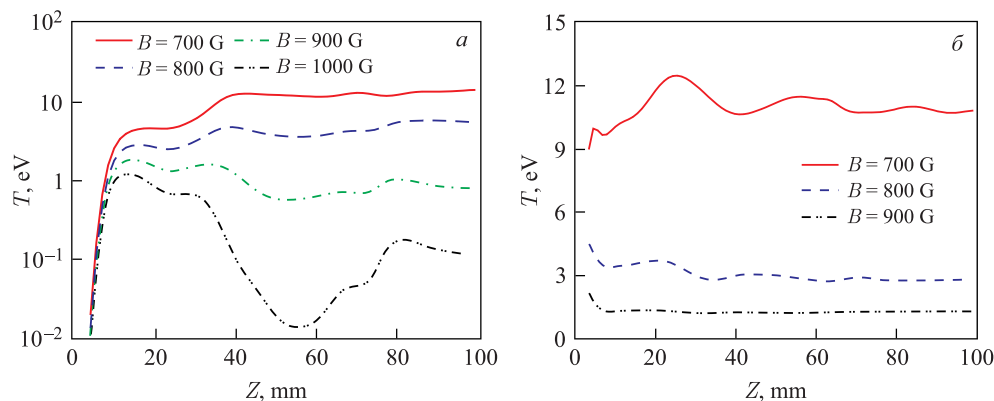


Рис. 5. Поведение температуры электронного пучка при прохождении электронной пушки при различных значениях фокусирующего продольного магнитного поля: а) для пушки с плоским катодом; б) для пушки с выпуклым катодом

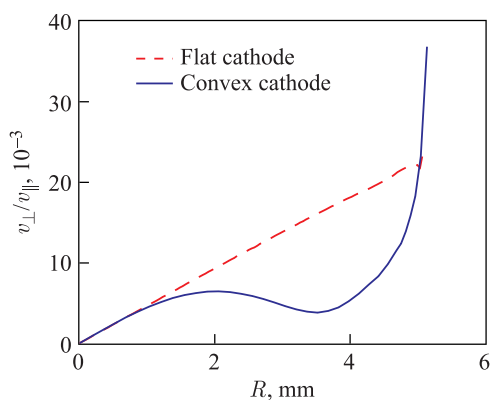


Рис. 6. Распределение амплитуды поперечной скорости электронов в зависимости от расстояния до оси пучка

Так как электронная пушка осесимметрична, то на ее оси поперечные компоненты электрического поля равны нулю. Следовательно, центр пучка нагревается слабее, чем его края. На рис. 6 в относительных единицах представлено распределение амплитуды поперечной скорости электронов в зависимости от расстояния до оси пучка. Для пушки с плоским катодом данная зависимость почти линейна, и, следовательно, поперечную скорость электронов можно уменьшить при помощи осесимметричной электростатической линзы, поле которой изменяется с расстоянием от оси как $E_r \propto r$.

Распределение электронной плотности.

Как упоминалось ранее, в ходе работы с СЭО может потребоваться изменить распределение плотности электронного пучка, в том числе уменьшить поперечные размеры пучка за счет подавления эмиссии на краях катода. Получение электронного пучка с увеличенной плотностью частиц на краях может быть полезно в отдельных экспериментах по охлаждению (выравнивание времен охлаждения ионов с различной амплитудой бетатронных колебаний) [10, 18]. Узкий же электронный пучок полезен при настройке оптики транспортного канала СЭО. На рис. 7 представлены распределения плотности электронного пучка при различных режимах работы с пучком (U_{grid} – напряжение на управляющем электроде).

В случае плоского катода намного проще получить однородный электронный пучок (рис. 7, а), однако сложнее сделать пучок с повышенной плотностью на краях. Помимо этого, как было отмечено ранее, у пушки с выпуклым катодом ток выходного пучка выше.

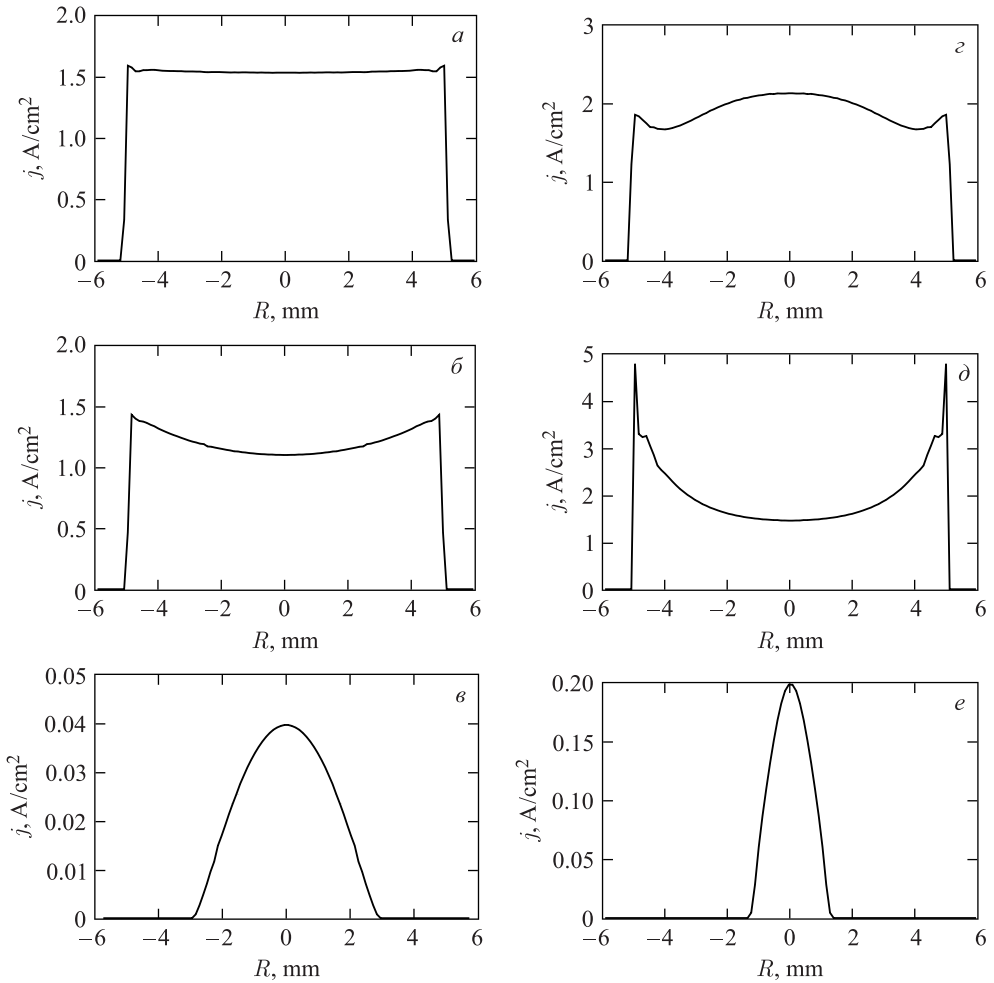


Рис. 7. Распределение плотности тока по сечению электронного пучка. Пушка с плоским катодом ($B = 900$ Гс): а) $U_{\text{anode}} = 20$ кВ, $U_{\text{grid}} = 2,5$ кВ; б) $U_{\text{anode}} = 10$ кВ, $U_{\text{grid}} = 4$ кВ; в) $U_{\text{anode}} = 11$ кВ, $U_{\text{grid}} = -3$ кВ. Пушка с выпуклым анодом ($B = 1000$ Гс): г) $U_{\text{anode}} = 15$ кВ, $U_{\text{grid}} = 1,3$ кВ; д) $U_{\text{anode}} = 18$ кВ, $U_{\text{grid}} = -2,5$ кВ; е) $U_{\text{anode}} = 10$ кВ, $U_{\text{grid}} = 2$ кВ

Вольт-амперные характеристики пушек. Важным параметром, характеризующим эффективность электронной пушки, является ее первеанс $g = I_e / U_{\text{anode}}^{3/2}$. Поскольку в системе помимо анода имеется также управляющий электрод, удобно в качестве параметра ввести отношение напряжения управляющего электрода к напряжению анода $U_{\text{grid}} / U_{\text{anode}}$. Действительно, если изменять напряжения анода и управляющего электрода пропорционально, то картина силовых линий будет неизменной, как и значение первеанса. На рис. 8 представлены зависимости первеанса для пушек с плоским и выпуклым катодами от соотношения напряжений между управляющим электродом и анодом. Видно, что у пушки с выпуклым катодом первеанс значительно выше.

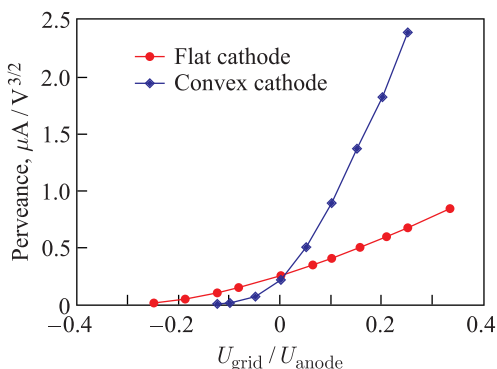


Рис. 8. Зависимость первеанса пушек от отношения напряжений управляющего электрода и анода

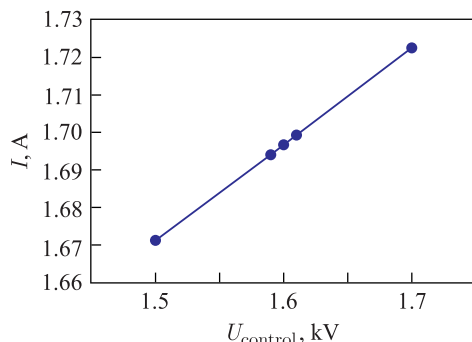


Рис. 9. Зависимость тока электронного пучка от напряжения на одном из секторов управляющего электрода. $U_{\text{anode}} = 13 \text{ кВ}$, $U_{\text{grid}} = 1,6 \text{ кВ}$

Трехмерные расчеты четырехсекторного управляющего электрода. При изменении напряжения на одном из секторов управляющего электрода изменяется плотность тока на соответствующем краю пучка. Модуляция напряжения на таком секторе приводит к соответствующей модуляции плотности электронного тока, которую можно зарегистрировать при помощи электростатических датчиков положения пучка. Это, в свою очередь, можно использовать для измерения положения как целого пучка, так и его краев.

Оценка того, как изменение напряжения на отдельном секторе управляющего электрода влияет на распределение плотности тока электронного пучка, производилась на основе трехмерных расчетов, выполненных с использованием программного комплекса CST STUDIO. Для расчетов применялась геометрия электродов для пушки с выпуклым катодом (см. рис. 4, б).

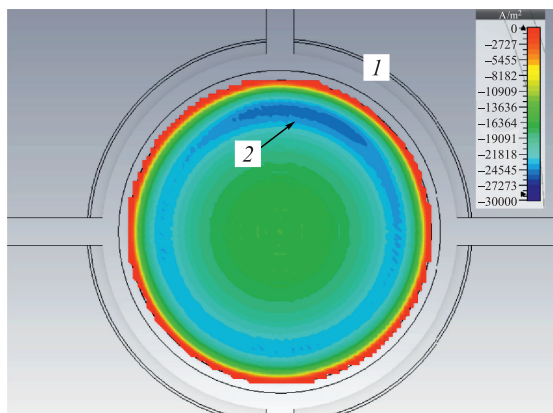


Рис. 10. Распределение плотности тока электронного пучка по его сечению на расстоянии 4 см от катода. $U_{\text{anode}} = 13 \text{ кВ}$, $U_{\text{grid}} = 1,6 \text{ кВ}$. Напряжение на электроде (1) — 1,7 кВ. Повышенная плотность тока на краю пучка (2) смещена, так как пучок проворачивается как целое в скрещенных полях (продольное магнитное поле и собственное электрическое поле пучка)

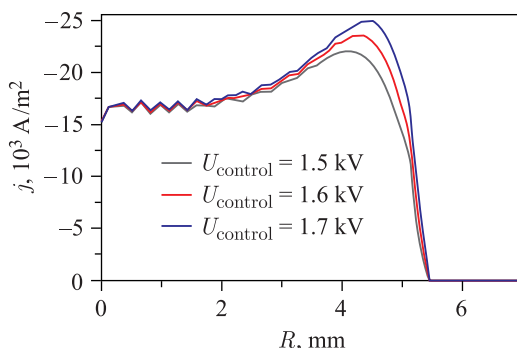


Рис. 11. Изменение плотности тока при варьировании напряжения на одном из секторов управляющего электрода. Плотность тока представлена для отрезка, направленного по радиусу пучка, начало которого лежит в центре пучка, а конец в точке максимального изменения плотности тока

Для моделирования использовался ряд параметров. Напряжение на аноде относительно катода выбиралось равным 13 кВ, напряжение на секторах управляющего электрода — 1,6 кВ. На одном из секторов управляющего электрода напряжение варьировалось в пределах ± 100 В. Зависимость полного тока пучка от напряжения на выделенном секторе управляющего электрода представлена на рис. 9.

На рис. 10 представлено распределение плотности тока в сечении электронного пучка при изменении напряжения на одном из секторов управляющего электрода на +100 В. Плотность тока вдоль линии, направленной от оси пучка к области максимального изменения плотности тока, приведена на рис. 11. Как видно, вариация напряжения на одном из секторов в пределах от -100 до $+100$ В приводит к локальному изменению плотности тока примерно на $0,3 \text{ A/cm}^2$ и полного тока на 52 мА, что достаточно для детектирования при помощи электростатических датчиков положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что у каждого из представленных вариантов электронной пушки есть как плюсы, так и минусы. Для пушки с плоским катодом проще подобрать параметры оптики для минимизации температуры. В случае пушки с выпуклым катодом электронный ток выше и заметно проще регулируется профиль пучка, однако при необходимости дополнительно уменьшить температуру выходного электронного пучка могут потребоваться нелинейные корректирующие элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170. С. 473–493.
2. Kain V. Beam Dynamics and Beam Losses — Circular Machines // Proc. of the Joint Intern. Accel. School, 2016; doi: 10.5170/CERN-2016-002.21.
3. Будкер Г. И. и др. Предложение по осуществлению встречных протон-антипротонных пучков на основе метода электронного охлаждения в проекте ускорительно-накопительного комплекса Большого Серпухова. Препринт ИЯФ 76-93. Новосибирск, 1976. 18 с.

4. Мешков И. Н., Сидорин А. О. Состояние и перспективы развития метода электронного охлаждения // Письма в ЭЧАЯ. 2004. № 3[120]. С. 22–31.
5. Будкер Г. И. Эффективный метод демпфирования колебаний частиц в протонных и антипротонных накопителях // АЭ. 1967. Т. 22, вып. 5. С. 346–348.
6. Buble A. *et al.* The Electron Gun with Variable Beam Profile for Optimization of Electron Cooling // Proc. of EPAC-02. 2002. P. 1356–1358.
7. Behtenev E. *et al.* Commission of Electron Cooler EC-300 for HIRFL-CSR // Proc. of EPAC-04. 2004. P. 1419–1421.
8. Bryzgunov M. *et al.* Electron Gun with Variable Beam Profile for COSY Cooler // Proc. of COOL'11. 2011. P. 99–102.
9. Брызгунов М. И. и др. Особенности динамики охлаждения на высоковольтной установке электронного охлаждения в COSY // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 8. С. 124–131.
10. Buble A. V., Parkhomchuk V. V., Reva V. B. Advantages of Electron Cooling with Radially Varying Electron Beam Density // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 532, Iss. 1–2. P. 303–306; doi: 10.1016/j.nima.2004.06.059.
11. Ryutov D. D. Theoretical Evaluation of the Angular Spread of the Electron Beam Generated in a Guiding Magnetic Field // Proc. of IX Intern. Conf. High Power Particle Beams. 1992. P. 1009.
12. Dietrich J., Parkhomchuk V. V. The Proposed 2 MeV Electron Cooler for COSY-Juelich // Proc. of EPAC-06. 2006. P. 1684–1686.
13. Куделайнен В. И., Мешков И. Н., Салимов Р. А. Формирование интенсивного электронного пучка в продольном магнитном поле // ЖТФ. 1971. Т. 41, вып. 11. С. 2294.
14. Sharapa A., Shemyakin A., Nagaitsev S. Electron Gun and Collector for the Fermilab High-Energy Electron Cooling // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 417. P. 177–181; doi: 10.1016/S0168-9002(98)00688-3.
15. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009. 294 с.
16. Reva V. B. *et al.* COSY 2 MeV Cooler: Design, Diagnostic and Commissioning // IPAC2014. 2014. P. 777–779; doi: 10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRI075.
17. Ivanov A., Tiunov M. ULTRASAM-2D Code for Simulation of the Electron Guns with Ultra High Precision // Proc. of EPAC02. 2002. P. 1634–1636.
18. Buble A. V. *et al.* Measurements of the Profile of an Intense Electron Beam // Instr. Exp. Tech. 2006. V. 49, No. 1. P. 83–91; doi: 10.1134/S0020441206010106.

Получено 27 мая 2019 г.