

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*М. И. Брызгунов^{а,1}, А. В. Бублей^а, А. П. Денисов^а, В. В. Пархомчук^а,
В. М. Панасюк^а, В. Б. Рева^{а,б}, А. А. Путьмаков^а*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Как правило, в системах электронного охлаждения используется метод рекуперации энергии электронного пучка. От эффективности рекуперации зависят стабильность работы системы, вакуумные условия и радиационный фон, что особенно критично для высоковольтных охладителей. При этом единственным способом повышения эффективности рекуперации в высоковольтных охладителях является повышение эффективности электронного коллектора. В статье описаны варианты реализации высокоэффективных коллекторов для высоковольтных систем электронного охлаждения.

Usually in electron cooling systems the electron energy recuperation method is used. Recuperation efficiency influences the system work stability, vacuum conditions and radiation, which is especially important in high voltage coolers. The only way to improve recuperation efficiency in high voltage coolers is improving of the electron collector efficiency. The article describes variants of electron collectors for high voltage electron cooling systems.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Метод электронного охлаждения основан на взаимодействии ионов с электронами за счет кулоновских столкновений на некотором общем участке траектории. Для наиболее эффективного охлаждения требуется, чтобы средняя скорость электронного пучка была равна средней скорости ионов. При этом энергия электронов в процессе взаимодействия практически не меняется. Таким образом, запасенная в электронном пучке мощность не расходуется и может быть рекуперирована [1]. При замедлении пучка до энергии, определяемой напряжением коллекторного источника (обычно не более 5 кэВ), мощность в пучке уменьшается, а нагрузка на основной высоковольтный источник определяется его внутренними сопротивлениями и током потерь.

Опыт разработки электронных охладителей показал, что желательно как можно сильнее понижать ток потерь, повышая эффективность рекуперации электронов

¹E-mail: M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su

(отношение тока потерь к току основного пучка) [2]. Это особенно важно при разработке высоковольтных охладителей, где высокий ток потерь ухудшает электрическую прочность, вакуумные условия и повышает радиацию.

В низковольтных охладителях можно повышать эффективность рекуперации, не повышая эффективность коллектора, методом компенсации центробежного дрейфа электрическим полем [3]. Данный метод позволил повысить эффективность рекуперации до величин порядка 10^{-7} при эффективности коллектора $\approx 5 \cdot 10^{-4}$. Однако единственный способ повысить эффективность рекуперации в высоковольтных охладителях — повысить эффективность электронного коллектора.

Таким образом, разработка высокоэффективных электронных коллекторов — очень важная задача, особенно при проектировании высоковольтных систем электронного охлаждения (СЭО).

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЭО

Большинство коллекторов в системах электронного охлаждения представляют собой цилиндр Фарадея с дополнительными электродами, создающими запирающий потенциал, препятствующий выходу отраженных от поверхности коллектора вторичных электронов. Удержание в коллекторе дополнено магнитной пробкой, удерживающей вторичные электроны, движущиеся под большими углами относительно магнитной силовой линии.

Однако эффективность аксиально-симметричных коллекторов, даже при самых оптимальных условиях, не лучше чем $\approx 10^{-4}$ [4]. Это связано с тем, что в таком коллекторе у частицы есть возможность, отразившись от внутренней поверхности коллектора, вылететь из него (особенно у частиц в центре пучка).

В системе электронного охлаждения для комплекса тэватрон (с энергией электронов 4,3 МэВ) была предложена конструкция коллектора с поперечным магнитным полем внутри [5]. Идея состоит в том, чтобы силовые линии магнитного поля в коллекторе не были аксиально-симметричными, а поворачивались в одну сторону. Таким образом, внутри коллектора образуется поворот, который отклоняет весь пучок в одном направлении. При этом происходит смещение пучка перпендикулярно плоскости поворота за счет центробежного дрейфа. Отраженные электроны при этом так же смещаются относительно входа в коллектор за счет центробежного дрейфа. Если полная величина смещения вторичных электронов такова, что они все не попадают в апертуру входа в коллектор, то эффективность коллектора значительно увеличивается, поскольку покинуть коллектор смогут не вторичные, а следующие поколения электронов.

В экспериментах, проведенных на испытательном стенде и на самом охладителе, разработчиками была достигнута эффективность коллектора $(5-10) \cdot 10^{-6}$ при токе пучка до 2 А.

В более ранних работах тех же авторов предлагались другие конструкции коллектора для этого же охладителя: с квадрупольной компонентой магнитного поля [6] и без магнитного поля [7], где эффективность определяется его геометрией и соотношением запирающего напряжения и напряжения коллектора. Обе конструкции имели серьезные недостатки, поэтому разработчики пришли к конструкции, описанной выше.

При разработке коллектора высоковольтного охладителя COSY рассматривалась схема с магнитным поворотом, основанная на эффекте центробежного дрейфа (рис. 1). Перед коллектором устанавливается дрейфовый промежуток с продольным магнитным полем, изогнутый на 180° с радиусом ≈ 20 см. Для компенсации центробежной силы, действующей на основной пучок, в повороте создается поперечное магнитное поле. Для отраженных от коллектора электронов поперечное поле не компенсирует, а усиливает центробежный дрейф, поэтому электроны смещаются поперек плоскости поворота. Величина смещения Δx зависит только от импульса p , величины продольного поля B и от угла поворота α :

$$\Delta x = 2\alpha\rho, \quad (1)$$

где $\rho = pc/eB$, e — заряд электрона, c — скорость света в вакууме.

В дальнейшем решили отказаться от такой схемы в связи с большими техническими сложностями, которые возникали бы при сборке и разборке, в пользу схемы с фильтром Вина, которая выглядит заметно проще с этой точки зрения.

КОЛЛЕКТОР С ФИЛЬТРОМ ВИНА

Идея такого коллектора заключается в использовании скрещенных электрического и магнитного полей для перехвата потока отраженных от коллектора электронов (рис. 2) [8]. Для основного пучка действие поперечных сил компенсируется, и пучок движется без отклонения. Обратный поток электронов отклоняется в сторону, где затем поглощается специальной приемной пластиной.

На рис. 3 показан эскиз коллекторного узла высоковольтного охладителя COSY. Фильтр Вина представляет собой вставку длиной примерно 40 см между замедляющей электростатической трубкой и коллектором, помещенную в соленоид продольного магнитного поля. Для формирования поперечного магнитного поля используются постоянные магниты, а для создания продольного поля в фильтре его вакуумная камера помещена в соленоид, состоящий из отдельных катушек.

Использование коллектора с фильтром Вина на охладителе COSY позволило достичь эффективности лучше чем 10^{-6} при токе 0,9 А [9].

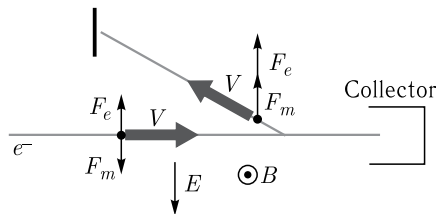


Рис. 2. Принцип работы фильтра Вина

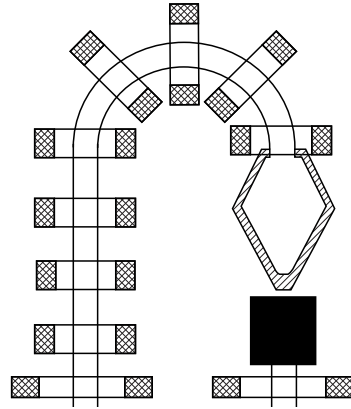


Рис. 1. Схема коллектора с поворотом

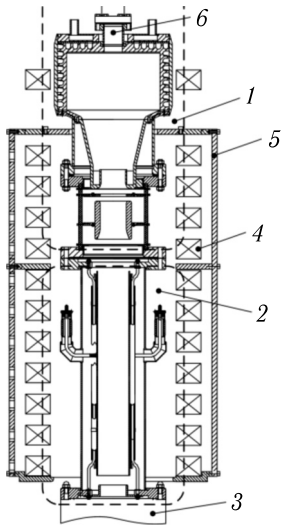


Рис. 3. Коллекторный узел: 1 — коллектор с супрессором и приколлекторным электродом; 2 — узел фильтра Вина; 3 — ускорительная трубка; 4 — катушки продольного поля; 5 — магнитный экран; 6 — фланец для дополнительной вакуумной откачки

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАЦИИ

На рис. 4 показано примерное распределение потенциала в высоковольтной системе электронного охлаждения COSY (с учетом заряда электрона). Напряжение катода электронной пушки относительно земли определяет энергию пучка в секции охлаждения. Эмитированный с поверхности катода пучок ускоряется под действием сначала поля анода, а затем электростатической трубки пушки. Пройдя транспортные каналы и секцию охлаждения (находящиеся под потенциалом земли), пучок попадает в электростатическую трубку коллектора, где он тормозится до энергии, определяемой потенциалом на оси фильтра Вина. После фильтра пучок проходит последовательно приколлекторный электрод, супрессор, входное отверстие коллектора и поглощается его поверхностью. Самым «узким» местом, с точки зрения потенциала, является барьер в области супрессора (ΔU_{\min}).

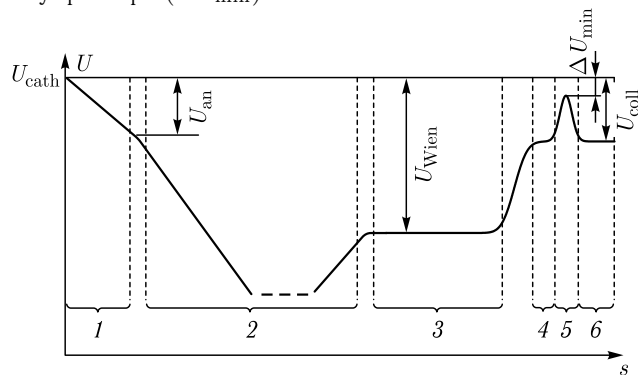


Рис. 4. Распределение потенциала на оси системы электронного охлаждения (с учетом знака заряда электрона). 1 — область катод-анод; 2 — ускоряющая трубка, транспортный канал с секцией охлаждения и замедляющая трубка; 3 — фильтр Вина; 4 — область приколлекторного электрода; 5 — область супрессора; 6 — коллектор

При движении в такой системе важным фактором, влияющим на эффективность рекуперации, является возможность перекачки энергии между поперечным и продольным движением электронов. Если изменение продольной энергии настолько велико, что ее не хватает для преодоления барьера ΔU_{\min} , то электроны начнут отражаться от потенциального барьера раньше, чем достигнут поверхности коллектора. Это может произойти в результате прохождения различных элементов, когда в пучке может возбуждаться сильное поперечное движение [10]. Однако качество проводки пучка можно исправить путем подстройки полей в магнитных элементах, т.е. данный эффект является устранимым и не относится к свойствам коллектора, поэтому здесь его не рассматриваем.

Другой класс эффектов, влияющих на качество пучка, — это рассеяние электронов на различных объектах при прохождении от пушки до коллектора, поскольку в процессе рассеяния энергия частицы также может измениться более чем на $e\Delta U_{\min}$.

Для высоковольтной системы электронного охлаждения синхротрона COSY были проведены оценки таких эффектов [11]. Эти оценки также интересны с точки зрения реализации проекта охладителя коллайдера NICA, поскольку параметры этих систем очень близки. Были рассмотрены следующие эффекты: поперечно-продольная релаксация, продольно-продольная релаксация [12], однократное рассеяние на большие углы (эффект Тушека), многократное рассеяние на остаточном газе, рассеяние на остаточном газе на большие углы, потери на ионизацию остаточного газа. Результаты оценок показали, что влияние большинства эффектов на эффективность коллектора мало. Исключением является процесс однократного внутривпучкового рассеяния на большие углы (эффект Тушека), когда за счет кулоновских столкновений часть энергии поперечного движения трансформируется в продольный разброс импульсов, достаточно большой, чтобы повлиять на попадание электрона в коллектор.

Для расчетов эффекта Тушека пользовались методикой, приведенной в [13]. Считаем, что при взаимном рассеянии двух электронов потерян будет только один, чья энергия в лабораторной системе отсчета снизится более чем на величину $\Delta E_m = e\Delta U_{\min}$.

Относительное количество потерянных частиц за время пролета пучка от пушки до коллектора равно

$$\frac{N_{\text{loss}}}{N_0} = \frac{1}{N_0} \left(\frac{dN}{dt} \right) \tau = \langle \sigma V \rangle n \tau, \quad (2)$$

где τ — время пролета от пушки до коллектора в системе отсчета пучка; N_0 — количество частиц в пучке; $dN/dt = \langle \sigma V \rangle \int n^2 dv$ — количество таких столкновений в единицу времени; $\sigma = ((8\pi r_e^2)/(V/c)^4)(1/\mu^2 - 1 + \ln \mu)$ — сечение потерь. Интегрирование ведется по объему v . Треугольные скобки означают усреднение по функции распределения по скоростям:

$$\langle \sigma V \rangle = \int_{V_c}^{\infty} \sigma V f(V) dV, \quad (3)$$

где нижний предел интегрирования V_c соответствует минимальной скорости, при которой возможно рассеяние с потерей электрона: $V_c = \Delta E_m/p_0$, где p_0 — импульс электронов в лабораторной системе.

В данных расчетах никак не учтено влияние продольного магнитного поля, которое должно уменьшить потери, поскольку если диаметр кружка ларморовского вращения электрона в продольном поле меньше, чем расстояние между частицами, то вероятность столкновения частиц уменьшается и эффект будет сильно подавлен. Это условие можно записать в виде неравенства

$$R_L = \frac{mcV_B}{eB} > \frac{n^{-1/3}}{2}. \quad (4)$$

Отсюда получается минимальная скорость, при которой происходят потери из-за эффекта Тушека:

$$V_B = \frac{eB}{2n^{1/3}mc}. \quad (5)$$

Для учета данной скорости необходимо модифицировать формулу (3), где в нижнем пределе интегрирования вместо V_c необходимо поставить максимальную величину из V_c и V_B .

На рис. 5 показаны зависимости относительных потерь частиц из-за эффекта Тушека от энергии пучка при различных параметрах. Считаем, что распределение по поперечным скоростям максвелловское с температурой T (которую считаем равной температуре катода 1000°C).

Видно, что потери без учета магнитного поля очень высоки в сравнении с требуемой эффективностью рекуперации 10^{-5} . С учетом магнитного поля, при величине барьера 500 В и токе пучка 1 А потери за счет эффекта Тушека меньше чем 10^{-5} . Однако, чтобы получить такие потери для тока 3 А, необходимо повышать величину барьера примерно до 1 кВ. При этом обычное значение данного напряжения находится на уровне нескольких сотен вольт и является компромиссом между необходимостью провести через барьер основной пучок (с учетом его собственного пространственного заряда) и желанием как можно сильнее запереть вторичные электроны в коллекторе. При увеличении данного напряжения будет ухудшаться эффективность коллектора уже за счет вторичной электронной эмиссии.

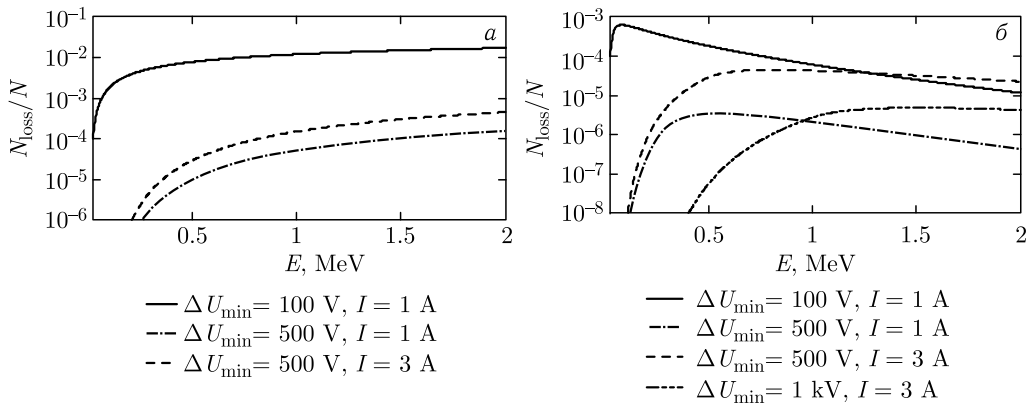


Рис. 5. Зависимость относительных потерь из-за эффекта Тушека от энергии пучка при различных значениях величины потенциального барьера и тока пучка: а) без учета магнитного поля; б) с учетом магнитного поля ($B = 1 \text{ кГс}$)

К похожим выводам о наибольшем влиянии однократного внутрипучкового рассеяния на большие углы пришли авторы работы [14], в которой оценивалось влияние эффектов рассеяния на эффективность рекуперации в электронном охладителе комплекса тэватрон (США).

Следует отметить, что в использовавшихся оценках не в полной мере учитывается влияние магнитного поля на динамику процесса рассеяния, которое может ослабить эффект за счет эффекта замагниченности столкновений, открытого при исследовании кинетики электронного охлаждения [15], поэтому данная проблема требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке высоковольтных систем электронного охлаждения важным элементом является электронный коллектор. От эффективности коллектора напрямую зависит эффективность рекуперации, которая определяет стабильность и качество работы системы. В различных работах предлагались различные схемы реализации высокоэффективных коллекторов для высоковольтных систем электронного охлаждения. Реализованные на практике варианты позволили добиться высокой эффективности при номинальных токах электронного пучка.

По результатам расчетов влияния процессов рассеяния и ионизации на эффективность рекуперации можно сделать вывод о том, что при условиях, соответствующих высоковольтной установке электронного охлаждения для COSY и коллайдера NICA, их влиянием можно пренебречь. Исключением является эффект Тушека. Однако в приведенных расчетах не в полной мере учитывается влияние продольного магнитного поля, которое может значительно уменьшить вероятность и кинетику однократного рассеяния электронов друг на друге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куделайнен В.И. и др.* Глубокое торможение электронного пучка в системе с продольным магнитным полем // ЖТФ. 1976. Т. 46, вып. 8. С. 1678–1686.
2. *Shemyakin A., Prost L.* Ultimate Performance of Relativistic Electron Cooling at Fermilab // Proc. of COOL 2011, Alushta, Ukraine. 2011. P. 31–36.
3. *Ellison T., Friesel D., Brown R.* Status and Performance of the IUCF 270 Electron Cooling System // Proc. of PAC 1989, Chicago, IL. 1989. P. 633–635.
4. *Sharapa A.N., Shemyakin A.V.* Secondary Electron Current Loss in Electron Cooling Devices // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 351. P. 295–299.
5. *Prost L., Shemyakin A.* Efficiency of the Fermilab Electron Cooler's Collector // Proc. of PAC 2005, Knoxville, Tennessee. 2005. P. 2387–2389.
6. *Shemyakin A.* Electron Beam Collector with a Transverse Magnetic Field // Proc. of EPAC 2000, Vienna, Austria. 2000. P. 1268–1270.
7. *Sharapa A.N., Shemyakin A.V.* Secondary Electron Flow from the Axially Symmetric Collector without Magnetic Field // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 396. P. 110–114.
8. *Мешков И.Н., Салимов Р.А., Файнштейн В.Г.* Многократная рекуперация энергии электронов // ЖТФ. 1973. Т. 43, вып. 8. С. 1782–1784.

9. *Bryzgunov M. I. et al.* High Efficiency Electron Collector for the High Voltage Electron Cooling System of COSY // Proc. of COOL 2015, Newport News, VA, USA. 2015. P. 112–115.
10. *Bryzgunov M. I., Panasyuk V. M., Reva V. B.* Calculations of Electron Beam Motion in Electron Cooling System for COSY // Proc. of COOL 2009, Lanzhou, China. 2009. P. 134–137.
11. *Брызгунов М. И.* Электронный коллектор высоковольтной системы электронного охлаждения для COSY. Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2013. С. 61–86.
12. *Куделайнен В. И. и др.* Температурная релаксация в замагниченном электронном потоке // ЖЭТФ. 1982. Т. 83, вып. 6. С. 2056–2064.
13. *Wrulich A. F.* Single-Beam Lifetime // Proc. of CAS–CERN Accelerator School: 5th General Accelerator Phys. Course, Jyväskylä, Finland, 1994. Report CERN-94-01. V. 1. P. 409–435.
14. *Burov A. et al.* IBS in a CAM-Dominated Electron Beam // Proc. of COOL 2005, Galena, USA. 2005. P. 159–161.
15. *Диканский Н. С. и др.* Предельные возможности электронного охлаждения. Препринт ИЯФ 88-61. Новосибирск, 1988. 60 с.