

УДК 621.384.6

ПЕРЕЗАРЯДНАЯ ИНЖЕКЦИЯ В СИНХРОТРОН С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

И. Н. Мешков^а, А. О. Сидорин^а, Й. Штайн^б, Ю. Дитрих^б, В. Камерджиев^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Исследовательский центр в Юлихе, Германия

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса охлаждения пучка протонов на накопителе COSY (Юлих, Германия). Интенсивность охлажденного пучка ограничивается двумя факторами: потерями ионов непосредственно после инжекции в присутствии электронного пучка и развитием неустойчивости в хорошо охлажденном пучке. Описаны способы подавления неустойчивости, позволяющие повысить интенсивность охлажденного пучка. Приводятся требования к основным параметрам системы электронного охлаждения бустера синхротрона «Нуклотрон».

Results of experimental investigations of the electron cooling of a proton beam at COSY (Juelich, Germany) are presented. Intensity of the ion beam is limited by two general effects: particle loss directly after the injection and development of instability in a deep-cooled ion beam. Methods of the instability suppression, which allow one to increase the cooled beam intensity, are described. Requirements to general parameters of the Nuclotron booster electron cooling system are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема формирования интенсивных ионных пучков является достаточно общей для современных накопителей. Большой интерес представляют пучки поляризованных частиц и ионов радиоактивных изотопов. Источники таких частиц, как правило, имеют невысокую интенсивность, и получение высокой светимости эксперимента связано с предварительным накоплением ионов. Одним из наиболее эффективных методов инжекции, применяемых для накопления ионных пучков, является перезарядная инжекция. При низкой интенсивности ионного пучка из источника применяется многооборотная перезарядная инжекция. При многооборотной инжекции пучок ионов заполняет весь акцептанс накопителя, и его эффективное использование затруднено без применения охлаждения. Сочетание многооборотной перезарядной инжекции и электронного охлаждения используется для накопления и формирования интенсивных пучков протонов и дейтронов (не поляризованных и поляризованных) на накопителе COSY (Исследовательский центр в Юлихе, Германия) [1]. Использование систем электронного охлаждения планируется в нескольких сооружаемых или разрабатываемых новых установках. Например, в реализуемом в настоящее время в ИТЭФ (Москва) проекте ТВН (тераваттный накопитель) система электронного охлаждения может быть использована для накопления пучков тяжелых ионов с плотностью, предельной по пространственному заряду [2]. Проекты новых накопительных комплексов радиоактивных ионов MUSES (RIKEN, Япония) и GSI (Дармштадт, Германия) также предполагают использование электронного охлаждения

для формирования интенсивных пучков ионов. Одним из возможных направлений развития ускорительного комплекса «Нуклотрон» (ОИЯИ, Дубна) является создание бустера с аксептансом, существенно превышающим аксептанс нуклотрона, основное назначение которого — повышение светимости экспериментов с пучками поляризованных дейтронов и тяжелых ионов [3]. Использование системы электронного охлаждения на бустере может существенно повысить его технические возможности. Однако для многооборотной инжекции характерна большая величина шестимерного фазового объема инжектированного пучка, что может приводить к специфическим ограничениям его интенсивности при применении электронного охлаждения. Авторами данной работы приводятся результаты исследования природы ограничения интенсивности накопленного пучка протонов на синхротроне COSY и оценки эффективности применения электронного охлаждения в бустере синхротрона «Нуклотрон».

1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ НА СИНХРОТРОНЕ COSY

Протонный накопитель-синхротрон COSY (Cooler Synchrotron), оборудованный системами электронного и стохастического охлаждения, предназначен для широкого круга исследований в области физики частиц и ядерной физики. Накопитель COSY имеет форму рейстрека. В двух длинных прямолинейных промежутках расположены устройства инжекции, электронного охлаждения и ускорения (ВЧ-станция). Основные параметры накопителя и системы электронного охлаждения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры накопителя и системы электронного охлаждения

Параметры накопителя	
Периметр накопителя, м	183,473
Энергия инжекции, МэВ	45 — протоны, 75 — дейтроны
Максимальная энергия, ГэВ	2,7
Длина прямолинейных промежутков, м	40
Бетатронные числа Q_x, Q_y	3,62; 3,66
Хроматичность ξ_x, ξ_y	-10,28; 1,31
Критическая энергия, Мс ²	2,2
Аксептанс $A_x, A_y, \mu \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	60, 24
Бетатронные функции в секции охлаждения $\beta_x, \beta_y, \text{м}$	7, 17
Дисперсия в секции охлаждения, м	-6,3
Параметры системы электронного охлаждения	
Энергия электронов, кэВ	24,5
Ток электронов, А	0,05–0,6
Радиус пучка, см	1,27
Длина участка электронного охлаждения, м	2,0
Напряженность магнитного поля, Гс	800

Инжектором служит циклотрон, в котором ускоряются отрицательно заряженные ионы H^- и D^- . В накопителе COSY используется техника перезарядной инжекции с полной обдиркой ионов в мишени. Пучок ионов H^- или D^- из циклотрона обдирается углеродной пленкой толщиной 20–25 мкг/см² и аккумулируется за несколько тысяч оборотов до полного заполнения акцептанса накопителя. В процессе инжекции циркулирующий пучок многократно пересекает мишень, и амплитуда бетатронных колебаний частиц возрастает до величины, определяемой акцептансом накопителя. При эффективности инжекции порядка 20 %, токе циклотрона 6 мкА и длительности импульса инжекции 15 мс типичная интенсивность пучка после однократной инжекции составляет 10^{11} протонов.

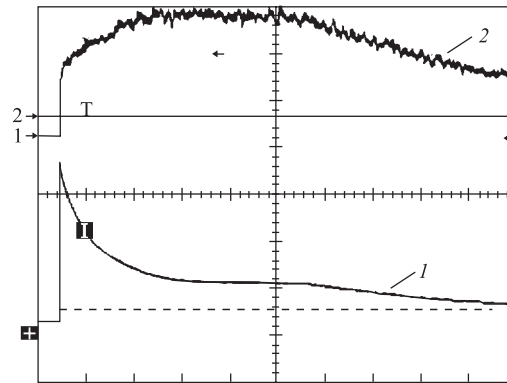


Рис. 1. Изменение во времени тока протонного пучка (кривая 1) и скорости счета нейтральных атомов (кривая 2) при однократной инжекции. Масштаб по оси времени — 5 с/деление, ток протонов 100 мВ/деление $\approx 1,25 \cdot 10^{10}$ протонов, темп счета H^0 1 В/деление = 3000 Гц

Пример изменения интенсивности протонного пучка в процессе охлаждения после инжекции представлен на рис. 1, на котором приведены осциллограммы сигналов датчика тока циркулирующего пучка и датчика интенсивности потока атомов водорода, образующихся в секции охлаждения при рекомбинации ионов с электронами охлаждающего пучка. В течение первых примерно десяти секунд после импульса инжекции интенсивность циркулирующего пучка (кривая 1) быстро убывает. При этом скорость счета нейтральных атомов (кривая 2) возрастает. Это объясняется тем, что после инжекции ионный пучок занимает полный акцептанс накопителя и его радиус в секции охлаждения больше радиуса электронного пучка. Вклад в рекомбинацию дают только ионы, пересекающие секцию охлаждения внутри электронного пучка. Сразу после инжекции происходят потери части ионов с большими амплитудами бетатронных колебаний, у другой части ионов амплитуда бетатронных колебаний уменьшается за счет охлаждения — пучок протонов сжимается, интенсивность его в центральной части растет. В период 10–20 с интенсивность и скорость счета почти постоянны — все протоны находятся внутри электронного пучка, идет процесс охлаждения. Через 25–30 с после импульса инжекции вновь начинается быстрая гибель протонов. К этому времени протонный пучок хорошо охлажден и плотность его достигает некоторого порогового значения, достаточного для развития неустойчивости.

При выключенной системе охлаждения время жизни протонов непосредственно после импульса инжекции существенно выше, и оно снижается при увеличении тока электронного пучка. Сокращение времени жизни ионов, имеющих большие амплитуды бетатронных колебаний, в присутствии электронного пучка впервые наблюдалось на накопителе

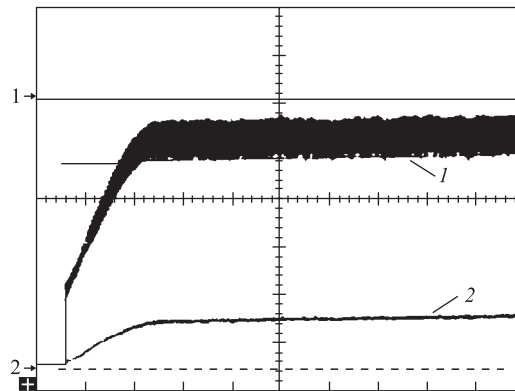
CELSIUS (Упсала, Швеция) и получило название «электронный нагрев» [4]. Существенными особенностями процесса является уменьшение времени жизни протонного пучка при увеличении тока электронного пучка или интенсивности ионного пучка. На настоящее время предложены два альтернативных объяснения эффекта «электронного нагрева». Первое из них — влияние нелинейностей собственного поля электронного пучка на динамику движения ионов, амплитуды поперечных колебаний у которых больше радиуса электронного пучка [4]. Другое объяснение [5] основано на том, что в секции охлаждения электроны и ионы совершают плазменные колебания в собственных полях. При превышении некоторого порогового значения произведения плотностей пучков эти колебания могут приводить к возрастанию флуктуации плотности в ионном пучке и раскачке когерентных поперечных колебаний охлажденного ядра ионного пучка. Шумы, вызванные колебаниями в центральной части пучка, и приводят к сокращению времени жизни ионов с большими амплитудами поперечных колебаний. Возможный механизм потерь ионов непосредственно после инжекции в COSY связан с особенностями положения его рабочей точки, величин хроматичности в главных плоскостях и наличием дисперсии в секции охлаждения. Численное моделирование динамики ионов показало, что в пределах поперечного аксептанта накопителя находится область параметрического резонанса вертикальных колебаний ионов. Инкремент нарастания амплитуды колебаний в ее центре составляет примерно 10^4 с^{-1} . Следовательно, все частицы, попавшие в зону резонанса, погибают непосредственно после инжекции. У частиц, находящихся вблизи зоны резонанса, амплитуда вертикальных колебаний осциллирует в широких пределах с частотой несколько кГц. Это является источником низкочастотного шума и приводит к снижению времени жизни частиц с большими амплитудами колебаний.

Следует отметить, что без применения охлаждения при группировке и ускорении инжектированного пучка теряется до 90 % частиц из-за большого начального разброса по импульсам. Группировка и ускорение предварительно охлажденного пучка практически не сопровождаются потерями частиц. Оптимизация параметров импульса инжекции и системы электронного охлаждения позволяет после однократной инжекции ускорить пучок с интенсивностью $(1,5-2) \cdot 10^{10}$ частиц.

Повышение интенсивности накопленного пучка возможно за счет многократного повторения импульсов инжекции. Повторение импульса инжекции без охлаждения приводит к потере циркулирующего пучка, ввиду того, что орбита снова смещается к перезарядной мишени. Применение электронного охлаждения уменьшает амплитуды бетатронных колебаний и вновь инжектированная порция ионов добавляется к охлажденному циркулирующему пучку и накапливается — «стэкируется» в поперечном фазовом объеме. При многократно повторяемой инжекции с применением процесса «стэкирования–охлаждения» интенсивность накопленного пучка может быть увеличена в несколько раз, что имеет принципиальную важность для экспериментов на пучке поляризованных ионов с внутренней мишенью. При использовании данной схемы инжекции интенсивность ионного пучка достигает насыщения по истечении некоторого времени накопления (рис. 2). В насыщении интенсивность накопленного пучка осциллирует с периодом повторения импульсов инжекции в окрестности некоторого среднего уровня, величина которого определяется параметрами импульса инжекции, качеством настройки системы охлаждения и величиной тока электронного пучка. При этом интенсивность потока атомов водорода из секции охлаждения остается практически постоянной. Это говорит о том, что при насыщении между импульсами инжекции происходят потери вновь инжектированных ионов,

а интенсивность охлажденного накопленного пучка остается примерно постоянной. Причиной быстрых потерь вновь инжектированных ионов, имеющих большие амплитуды бетатронных колебаний, может быть мощный диффузионный процесс, вызванный шумовым воздействием. Естественно предположить, что источником шума являются когерентные колебания самого охлажденного ядра пучка накопленных ионов.

Рис. 2. Динамика процесса накопления ионного пучка при многократной инжекции: длительность импульса инжекции 5 мс, длительность смещения равновесной орбиты на перезарядную мишень 15 мс, период повторения импульсов инжекции 2 с, ток электронного пучка 100 мА. Кривая 1 — сигнал датчика тока ($1,275 \cdot 10^{10}$ протонов/100 мВ); кривая 2 — показание измерителя потока атомов H^0 . Масштаб по оси времени — 50 с/деление. Пунктирная линия соответствует нулевому уровню для обеих функций



Следует отметить, что монотонный характер изменения интенсивности накопленного пучка со временем, представленный на рис. 2, наблюдается только при определенных параметрах импульса инжекции и токах электронного пучка. В общем случае процесс накопления сопровождается нерегулярными колебаниями интенсивности при достижении некоторой пороговой величины. Такой характер неустойчивости говорит о том, что когерентные колебания охлажденного ядра накопленного пучка в одних случаях вызывают лишь быстрые потери вновь инжектированных ионов, в других случаях приводят и к потерям уже накопленного пучка. Детальные исследования процесса охлаждения в режиме с низкой частотой повторения импульсов инжекции показали [6], что в пучке могут развиваться как горизонтальные, так и вертикальные когерентные колебания. При этом к потерям уже накопленного пучка приводят в основном вертикальные колебания ввиду меньшей величины вертикального акцептанса.

Таким образом, ограничение интенсивности ионного пучка при использовании электронного охлаждения связано в основном с двумя процессами. Первый процесс — снижение времени жизни ионов, имеющих большие амплитуды бетатронных колебаний, в присутствии электронного пучка, — ограничивает интенсивность ионного пучка при однократной инжекции. При многократно повторяемой инжекции интенсивность накопленного пучка ограничена развитием неустойчивости ионного пучка при его глубоком охлаждении. Для подавления потерь частиц при развитии такой неустойчивости на COSY было предложено использовать систему обратной связи по вертикальной степени свободы. В серии экспериментов в июне 2003 г. такая система была введена в действие, и в режиме многократного повторения импульсов инжекции интенсивность накопленного пучка была доведена примерно до 10^{11} протонов при устойчивом процессе накопления.

2. ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПУЧКА ИОНОВ В БУСТЕРЕ СИНХРОТРОНА «НУКЛОТРОН»

Применение перезарядной инжекции и электронного охлаждения для формирования ионного пучка, как и сходство научной программы, делает накопитель COSY ближайшим аналогом комплекса «Нуклотрон». В соответствии с первоначальным проектом инжекционный комплекс нуклотрона должен включать в себя бустерный синхротрон, линейный ускоритель ионов и несколько типов ионных источников [7]. В настоящее время применяется однооборотная инжекция в нуклотрон пучка, ускоренного в линейном ускорителе. Максимальная энергия при $A/Z = 2$ составляет 5 МэВ/нуклон. Эмиттанс пучка на выходе линейного ускорителя составляет $\sim 50 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в горизонтальной плоскости и $\sim 30 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в вертикальной (что примерно соответствует акцептансу синхротрона), относительный разброс по импульсам — примерно $\pm 2 \cdot 10^{-3}$. Максимальная частота повторения импульсов инжекции составляет 1 Гц.

Наиболее актуальна проблема повышения интенсивности для экспериментов с поляризованными дейтронами ввиду малой интенсивности источника. Использование бустера позволит оптимизировать процесс инжекции, увеличить длительность импульса инжекции и, соответственно, при той же интенсивности источника поляризованных отрицательно заряженных ионов дейтерия, существенно повысить интенсивность пучка, инжектируемого в нуклотрон за один импульс. Одна из возможных схем работы бустера заключается в следующем: пучок существующего линейного ускорителя с применением многооборотной перезарядной инжекции инжектируется в бустер с большой величиной акцептанса. После этого, на энергии инжекции, производится электронное охлаждение пучка ионов и за промежуток времени между импульсами инжекции эмиттанс циркулирующего пучка уменьшается до величины, необходимой для эффективного перевода в нуклотрон. Затем, без ускорения в бустере, пучок переводится в нуклотрон с помощью существующих элементов системы инжекции. Проект бустера [3] предполагает наличие прямолинейных секций длиной 6,5 м, в одной из которых может быть размещена система электронного охлаждения с эффективной длиной ~ 4 м. Параметры системы электронного охлаждения, определяемые из геометрических и технических ограничений, приведены в табл. 2.

Предельно достижимая эффективность системы электронного охлаждения рассчитывалась при помощи программы BETACOOL [8]. Применение электронного охлаждения в течение 1 с позволяет перевести из бустера в нуклотрон примерно 20% инжектированных в бустер дейтронов. Плотность частиц в фазовом объеме в пределах до $50 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в горизонтальной плоскости и до $30 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в вертикальной увеличивается при этом примерно в 15 раз. Пучок ионов, полностью заполняющий акцептанс бустера (акцептанс бустера составляет $400 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в горизонтальной плоскости и $225 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в вертикальной), может быть охлажден до требуемой величины эмиттанса примерно за 4–5 с.

Ввиду большой величины акцептанса бустера серьезной проблемой является минимизация шумов, вносимых в накопитель электронным пучком. Основные источники шумов — это неустойчивость первеанса электронной пушки и наличие неконтролируемой нейтрализации электронного пучка ионами остаточного газа. Эти эффекты были исследованы на стенде электронного охлаждения ОИЯИ, и найдены надежные пути их преодоления [9, 10].

Таблица 2. Основные параметры системы электронного охлаждения бустера нуклотрона

Эффективная длина секции охлаждения, м	4
Бета функции в секции охлаждения, м:	
горизонтальная	4
вертикальная	8
Радиус катода электронной пушки, см	2
Радиус пучка в секции охлаждения, см	2–4
Ток электронного пучка, А	0,2–0,4
Величина магнитного поля на катоде, Тл	0,2–0,8
Величина магнитного поля в секции охлаждения, Тл	0,1–0,2
Температура электронов, мэВ:	
поперечная степень свободы	200
продольная степень свободы	0,5

Большая величина тока электронов и низкая энергия приводят к более существенному влиянию собственного поля электронного пучка на динамику ионов, что накладывает дополнительные ограничения на выбор рабочей точки и другие параметры бустера. Основные эффекты: провисание потенциала по радиусу электронного пучка и смещение частот бетатронных колебаний за счет действия поля электронного пучка — необходимо учитывать при расчете динамической апертуры бустера и выборе его рабочей точки.

Чтобы избежать развития когерентной неустойчивости охлажденного ядра ионного пучка должны быть предусмотрены меры по ее подавлению. Наиболее эффективными из них являются система обратных связей и периодическая модуляция энергии электронного пучка, которая не приводит к снижению эффективности охлаждения ионов с большими амплитудами колебаний, но позволяет избежать глубокого охлаждения частиц с малыми амплитудами колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали исследования процесса электронного охлаждения на COSY и ряде других накопителей, устойчивость работы системы электронного охлаждения определяется не только параметрами электронного пучка, но существенно зависит также и от выбора рабочей точки и качества настройки самого накопителя. Выбор параметров накопителя и системы охлаждения должны осуществляться взаимосогласованно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штайн Й. и др. Текущее состояние электронного охлаждения на COSY (Юлих, Германия) // АЭ. 2003. Т. 94, вып. 1. С. 57–59.
2. Syresin E. et al. Project of TWAC Electron Cooler // Physica Scripta. 2003. V. 104. P. 160–163.

3. *Mikhailov V. et al.* Progress in the Nuclotron Booster Design // Proc. of EPAC2002, Paris, 2002. P. 596–598.
4. *Reistad D. et al.* Measurements of Electron Cooling and «Electron Heating» at CELSIUS // Proc. of Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Montreux, Oct. 4–8, 1993. CERN 94-03. 1994. P. 183–187.
5. *Parkhomchuk V., Pestrikov D.* Coherent Instabilities at Electron Cooling // Ibid. P. 327–329.
6. *Meshkov I. N. et al.* Observation of Instabilities of Electron Cooled Proton Beams. IKP Annual Report 2001. set <http://www.fz-juelich.de/ikp/publications/AR2001>
7. *Иссинский И. Б., Михайлов В. А.* Препринт ОИЯИ Р1-91-2. Дубна, 1991.
8. *Smirnov A. et al.* Computer Simulation of ECOOL and IBS Process in ACR and DSR Using BETACOOOL Program. RIKEN-AF-AC-21. 2000.
9. *Korotaev Yu. et al.* Neutralized Electron Beam for Electron Cooling // Proc. of the 4th Workshop on the Medium Energy Electron Cooling, Dubna, 1999. P. 297.
10. *Meshkov I. et al.* High Perveance Electron Gun for the Electron Cooling System // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 441, No. 1, 2. P. 92–95.