

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-2003-168

На правах рукописи  
УДК 621.384.633

**СИДОРИН**  
Анатолий Олегович

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ  
В НАКОПИТЕЛЯХ С МНОГООБОРОТНОЙ ПЕРЕЗАРЯДНОЙ  
ИНЖЕКЦИЕЙ И ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2003

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

И.Н.Мешков

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук

А.В.Агафонов

(ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН)

Доктор физико-математических наук

В.Н.Корчуганов

(ИЯФ им.Г.И.Будкера СО РАН)

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий, Серпухов

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2003 г. в  
“\_\_\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в  
Объединенном институте ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2003 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института  
ядерных исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Доктор физико-математических наук



Ю.А.Батусов

## Общая характеристика работы

### *Актуальность темы*

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 (однократной или многократно повторяемой) перезарядной инжекции и электронного охлаждения используется для накопления и формирования интенсивных пучков протонов и дейтронов (не поляризованных и поляризованных) на накопителе COSY (исследовательский центр Юлих, Германия). Электронное охлаждение пучка перед ускорением, например, в эксперименте BIG KARL приводит к увеличению эффективности его использования примерно в 60 раз благодаря меньшему размеру пучка и, что более важно, существенному снижению интенсивности гало. Использование систем электронного охлаждения планируется в нескольких сооружаемых или разрабатываемых новых установках. Например, реализуемый в настоящее время в ИТЭФ (Москва) проект ТВН (ТерраВаттный Накопитель) потребует накопления пучков тяжёлых ионов с плотностью, предельной по пространственному заряду. Для решения этой задачи планируется использование многократно повторяемой однооборотной перезарядной инжекции, а формирование фазового объема накопленного пучка, оптимального с точки зрения быстрого вывода, может быть осуществлено с помощью системы электронного охлаждения. Проекты новых

накопительных комплексов радиоактивных ионов MUSES (RIKEN, Япония) и GSI (Дармштадт, Германия) также предполагают использование электронного охлаждения для формирования пучков ионов и поддержания светимости в экспериментах с внутренней мишенью и ион-электронными столкновениями. Одним из возможных направлений развития ускорительного комплекса Нуклотрон (ОИЯИ, Дубна) является создание бустера с акцептансом, существенно превышающим акцептанс Нуклотрона, основное назначение которого - повышение светимости экспериментов с пучками поляризованных дейтронов и тяжелых ионов. 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, в основном связанным с двумя явлениями. Первое из них – это уменьшение времени жизни инжектированных частиц в присутствии электронного пучка. И второе – развитие неустойчивости пучка ионов при его глубоком охлаждении, приводящей к быстрым потерям частиц, что не позволяет довести плотность ионного пучка до предела по пространственному заряду. Неустойчивости процесса электронного охлаждения интенсивного ионного пучка наблюдались на ряде накопителей. Например, на накопителе COSY и снижение времени жизни ионов в присутствии электронного пучка, и развитие неустойчивости охлажденного пучка наблюдались с момента начала эксплуатации системы электронного охлаждения. Эти эффекты ограничивают интенсивность пучка протонов, используемого в экспериментах на COSY, на уровне  $1.5 \div 2 \cdot 10^{10}$  циркулирующих частиц при интенсивности инжекции до  $10^{11}$  частиц за импульс. В настоящее время предложено несколько объяснений наблюдаемых явлений, но физическая природа их до конца не выяснена. Поэтому экспериментальное исследование процесса накопления является актуальной задачей, а учет возможных отрицательных последствий использования охлаждения и разработка мер по их предотвращению необходимы при проектировании новых систем электронного охлаждения.

## ***Основные цели работы***

Данная работа имела следующие цели:

- экспериментальное исследование причин, приводящих к ограничению интенсивности ионного пучка в накопителях с многооборотной перезарядной инжекцией при его формировании с помощью системы электронного охлаждения,
- выработку основных требований к параметрам системы охлаждения и накопителя, позволяющих осуществить накопление ионного пучка до предела по пространственному заряду,
- разработку физического проекта системы электронного охлаждения для бустера синхротрона Нуклотрон.

## ***Научная новизна***

Впервые экспериментально исследован процесс развития неустойчивости интенсивного ионного пучка в накопителе COSY. Впервые проанализирован механизм потерь ионов непосредственно после инжекции, связанный с наличием дисперсии в секции охлаждения, большой величиной хроматичности в горизонтальной плоскости и нелинейностью собственного поля электронного пучка. Проведен расчет динамики электронного охлаждения ионного пучка в Бустере синхротрона Нуклотрон, сформулированы основные требования к системе электронного охлаждения, предложены меры по обеспечению устойчивости пучка в процессе охлаждения.

## ***Практическая ценность работы***

Полученные результаты позволяют оптимизировать работу систем электронного охлаждения в накопителях с многооборотной перезарядной инжекцией. Использование разработанной системы электронного охлаждения на бустере синхротрона Нуклотрон позволит поднять интенсивность пучка поляризованных дейтронов в Нуклотроне до предела по пространственному заряду при существующей системе инжекции.

### ***На защиту выносятся:***

Результаты экспериментальных исследований динамики охлаждения интенсивного протонного пучка на накопителе COSY, физический проект системы электронного охлаждения бустера синхротрона Нуклотрон, позволяющей осуществить накопление пучка ионов до предела по пространственному заряду.

1. Исследованы причины ограничения интенсивности пучка ионов в накопителе COSY. Показано, что предельная интенсивность ограничивается двумя основными процессами: сокращением времени жизни инжектированных ионов в присутствии электронного пучка и потерями ионов в охлажденном пучке.
2. Предложен механизм развития неустойчивости, приводящей к сокращению времени жизни инжектированного пучка, согласующийся с экспериментальными результатами и связанный с наличием дисперсии в секции охлаждения, большой величиной хроматичности в горизонтальной плоскости и нелинейностью собственного поля электронного пучка.
3. Экспериментально обнаружено, что потери частиц в охлажденном ионном пучке в накопителе COSY вызваны развитием когерентных бетатронных колебаний пучка.
4. Исследована динамика развития неустойчивости охлажденного пучка и дана ее интерпретация с помощью численного моделирования процесса охлаждения.
5. Разработан физический проект системы электронного охлаждения бустера накопителя Нуклотрон, позволяющей осуществить накопление пучка ионов до предела по пространственному заряду.

### ***Апробация работы***

Материалы диссертации докладывались на Европейской конференции по ускорителям ЕРАСС'2002 (Франция, 2002 г.), XVIII Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц РУПАК'2002 (Обнинск, 2002 г.), на международных совещаниях по электронному охлаждению (Уппсала 1998 г., Бэд Хоннеф, 2000 г.), неоднократно обсуждались на научных семинарах в

исследовательском центре Юлих и Объединенном Институте Ядерных Исследований.

### ***Публикации***

Результаты исследований, составивших основу диссертации, опубликованы в 7 печатных работах.

### ***Структура и объем диссертации***

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 50 наименований. Общий объем: 109 страниц.

### ***Содержание диссертационной работы***

Содержание работы изложено в четырех главах.

В **главе 1** дано описание схем однократной и многократно повторяемой многооборотной перезарядной инжекции на примере накопителя COSY. Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса накопления интенсивного протонного пучка на накопителе 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. Основной его особенностью является возможность формирования интенсивных пучков протонов и дейтронов (поляризованных и неполяризованных) с высокой плотностью в шестимерном фазовом пространстве – т.е. с малым эмиттансом и разбросом частиц по импульсу. После ускорения возможно как использование пучка ионов в экспериментах с внутренней мишенью, так и медленный или быстрый вывод его из накопителя. Применение перезарядной инжекции и электронного охлаждения для формирования ионного пучка, как и сходство научной программы, делает этот накопитель ближайшим аналогом комплекса Нуклотрон.

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 следующие:

Периметр накопителя, м	183.473
Ускоряемые частицы	протоны, дейтроны
Энергия инжекции, МэВ	45-протоны, 75-дейтроны
Максимальная энергия, ГэВ	2.7
Тип инжекции	H <sup>+</sup> , D <sup>+</sup> , перезарядная инжекция
Радиус траектории в арках, м	17.331
Длина прямолинейных промежутков, м	40
Бетатронные числа $Q_x, Q_y$	3.62, 3.66
Хроматичность $\xi_x, \xi_y$	-10.28, 1.31
Критическая энергия, Мс <sup>2</sup>	2.2
Акцептанс $A_x, A_y$ , п·мм·мрад	60, 24
Бетатронные функции в секции охлаждения $\beta_x, \beta_y$ , м	7, 17
Дисперсия в секции охлаждения, м	-6.3
Средний вакуум в накопителе, Торр	$5 \cdot 10^{-9}$

Параметры системы электронного охлаждения

Энергия электронов, кэВ	24.5
Ток электронов, А	0,05 – 0,6
Радиус пучка, см	1.27
Степень естественной нейтрализации, %	37
Длина участка электронного охлаждения, м	2.0
Напряжённость магнитного поля, Гс	800
Относительный ток потерь	$< 5 \cdot 10^{-4}$

В качестве инжектора служит циклотрон, в котором ускоряются отрицательно заряженные ионы H<sup>-</sup> и D<sup>-</sup>. В накопителе COSY используется техника перезарядной инжекции с полной обдиркой ионов в мишени. Пучок ионов H<sup>-</sup> или



D<sup>+</sup> из циклотрона обдирается углеродной пленкой толщиной 20 - 25 мкг/см<sup>2</sup> и аккумулируется в течении нескольких 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 мсек типичная интенсивность пучка после однократной инжекции составляет 10<sup>11</sup> протонов.

Типичный 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 (нижняя кривая) быстро убывает. При этом скорость счёта нейтральных атомов (верхняя кривая) 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 растёт. В период 10 - 20 секунд интенсивность и скорость счёта почти постоянны – все протоны находятся внутри электронного пучка, идёт процесс охлаждения. Через 25 - 30 секунд после импульса инжекции вновь начинается быстрая гибель протонов. К этому времени протонный пучок хорошо охлаждён и плотность его достигает некоторого порогового значения, достаточного для развития неустойчивости.

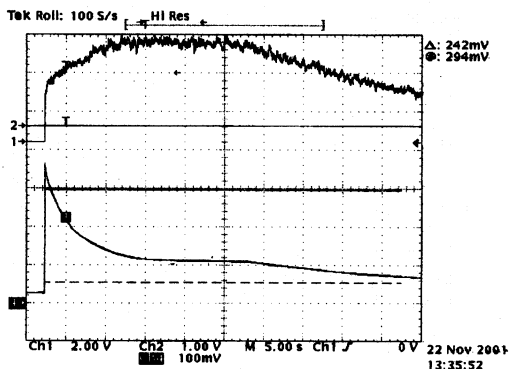


Рис. 1. Изменение во времени тока протонного пучка (нижняя кривая) и скорости счёта нейтральных атомов (верхняя кривая) при однократной инжекции. Масштаб по оси времени – 5 с/деление, ток протонов 100 мВ/деление  $\approx 1.25 \cdot 10^{10}$  протонов, темп счета  $H^0$  1 В/деление = 3000 Гц..

Без применения охлаждения время жизни протонного пучка 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». 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, если они производятся до того, как в пучке развивается неустойчивость, 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.

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. И второй процесс – развитие неустойчивости в хорошо охлажденном пучке.

**Глава 2** посвящена, в основном, исследованию природы уменьшения времени жизни пучка ионов с большим эмиттансом в присутствии электронного пучка.

В чистом виде этот эффект был исследован при отстройке энергии электронов от величины необходимой для охлаждения. В этом случае электронное охлаждение не имеет места, и может быть исследовано влияние шумов и нелинейностей, вносимых в систему электронным пучком, и двухпучковые эффекты, которые также могут влиять на время жизни ионов.

Существенными особенностями процесса является уменьшение времени жизни протонного пучка при увеличении тока электронного пучка или интенсивности ионного пучка. Измерения при включенном ВЧ резонаторе показали, что время жизни сгруппированного пучка сокращается примерно в коэффициент группировки раз. Это свидетельствует о том, что оно обратно пропорционально фазовой плотности пучка протонов. Кроме того, было экспериментально установлено, что сокращение времени жизни не может быть объяснено воздействием шумов, вносимых в систему самим электронным пучком.

На настоящее время предложены два альтернативных объяснения эффекта сокращения времени жизни ионного пучка в присутствии электронного. Первое из них – влияние нелинейностей собственного поля электронного пучка на динамику движения ионов, амплитуды поперечных колебаний у которых больше радиуса электронного пучка. Однако, описанный эффект имеет одночастичную природу и связан с сокращением динамической апертуры накопителя, что противоречит измерениям времени жизни хорошо охлажденного пучка ионов.

Другое объяснение, 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 раскату 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. При низкой плотности охлажденного ионного пучка колебания отсутствуют, и время жизни определяется рассеянием на полную апертуру.

В диссертации анализируется возможный механизм потерь ионов после инжекции, связанный с особенностями положения рабочей точки накопителя COSY, величин хроматичности в главных плоскостях и наличием дисперсии в секции охлаждения. На Рис. 2 приведен пример измерения спектров частот бетатронных колебаний протонного пучка при настройке накопителя для работы с электронным охлаждением. Широкий спектр частот бетатронных колебаний вызван с одной стороны большим начальным разбросом ионов по импульсу, нелинейностью поперечного движения и присутствием частиц с большими амплитудами колебаний – с другой.

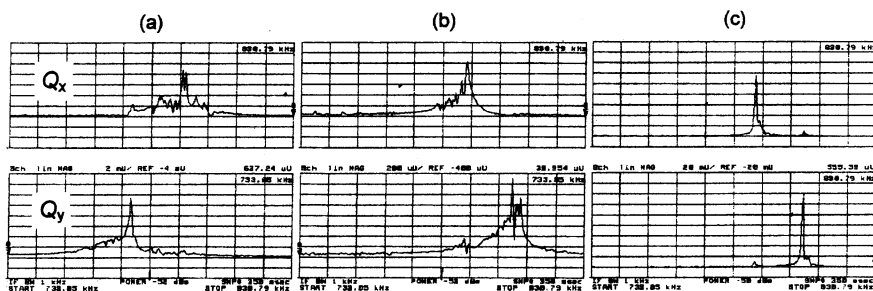


Рис. 2. Пример измерения спектров горизонтальных ( $Q_x$ ) и вертикальных ( $Q_y$ ) бетатронных колебаний. (a) начальная настройка при выключенных соленоидах секции охлаждения, (b) соленоиды секции охлаждения включены и орбита протонного пучка настроена для охлаждения. Спектр охлажденного пучка (c) существенно уже из-за меньшего разброса по импульсу. Полный размах графика по оси частот от 3.500 до 3.700, бетатронные частоты охлажденного пучка  $Q_x = 3.615$  и  $Q_y = 3.648$ .

Как видно из Рис. 2 (b) непосредственно после инжекции спектры частот бетатронных колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях перекрываются. Это может приводить к перекачке колебаний из одной плоскости

в другую, а в случае присутствия нелинейности фокусирующих полей и к параметрической раскачке колебаний. Центр зоны параметрического резонанса соответствует относительному отклонению ионов по импульсу, определяемому следующим выражением:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{Q_y - Q_x}{\xi_x - \xi_y},$$

что для параметров COSY составляет примерно  $-3.4 \cdot 10^{-3}$ , и находится внутри области захвата по продольному движению. Размер зоны резонанса и инкремент в ее центре определяется степенью нелинейности фокусирующих полей и, если нелинейность вызвана наличием электронного пучка, пропорциональны току последнего. Наличие дисперсии в секции охлаждения приводит к тому, что даже частицы с малыми амплитудами поперечных колебаний, но с большим начальным отклонением по импульсу, находятся на краю электронного пучка и их колебания существенно нелинейны. Кроме того, при наличии дисперсии, часть инжектированных частиц, имеющих большое отклонение по импульсу от равновесного, не пересекает электронный пучок в процессе поперечных колебаний и, следовательно, дает дополнительный вклад в потери при охлаждении.

Расчет, проведенный для раскачки малых вертикальных колебаний при параметрическом воздействии горизонтальных колебаний, показал, что область резонанса находится в пределах поперечного акцептанса накопителя, и инкремент нарастания амплитуды колебаний в ее центре составляет примерно  $10^4 \text{ с}^{-1}$ . Следовательно, все частицы, попавшие в зону резонанса, погибают непосредственно после инжекции. Для 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. Мощность шума пропорциональна плотности частиц вблизи зоны резонанса и при охлаждении по продольному импульсу, т.е. при уменьшении разброса по импульсу и стремлении отклонения по импульсу от номинального к нулю, мощность шума убывает, соответственно, время жизни растет. В хорошо

охлажденном пучке при рассеянии на ионах остаточного газа продольная компонента импульса частицы практически не изменяется, и время жизни определяется только рассеянием на поперечный аксептанс. Таким образом, наличие зоны параметрического резонанса для частиц с достаточно большим отклонением импульса от равновесного хорошо описывает все наблюдаемые особенности потерь ионов на накопителе COSY непосредственно после инжекции.

К потерям частиц приводит сочетание следующих особенностей накопителя и системы охлаждения:

- радиус ионного пучка после инжекции больше радиуса электронного,
- рабочая точка накопителя находится вблизи зоны резонанса связи,
- в секции охлаждения присутствует дисперсия,
- хроматичность накопителя в горизонтальной плоскости имеет такую величину, что зона резонанса связи находится внутри области захвата по продольному движению.

Полностью исключить подобный эффект можно в том случае, когда дисперсия в секции охлаждения равна нулю, а радиус электронного пучка превышает радиус ионного. Для параметров COSY ослабить этот эффект можно за счет коррекции хроматичности и смещения центра зоны резонанса за пределы области захвата по продольному движению. Предварительные эксперименты показали, что время жизни чувствительно к току возбуждения секступольных линз.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментальных исследований динамики развития когерентной неустойчивости, возникающей при глубоком охлаждении ионного пучка. Дана интерпретация результатов с помощью численного моделирования процесса охлаждения. Обсуждаются меры по обеспечению устойчивости интенсивного ионного пучка в присутствии охлаждения.

Если интервал времени между двумя последовательными импульсами инжекции больше 20 секунд, обычно наблюдаются быстрые потери частиц, что

ограничивает достижимую интенсивность накопленного пучка. На рисунке 3 приведен пример изменения интенсивности пучка при периоде повторения импульсов инъекции 30 с. Нижняя кривая представляет зависимость сигнала датчика тока от времени, верхняя – показания датчика темпа генерации нейтральных атомов ( $H^0$  монитор), который характеризует процесс охлаждения.

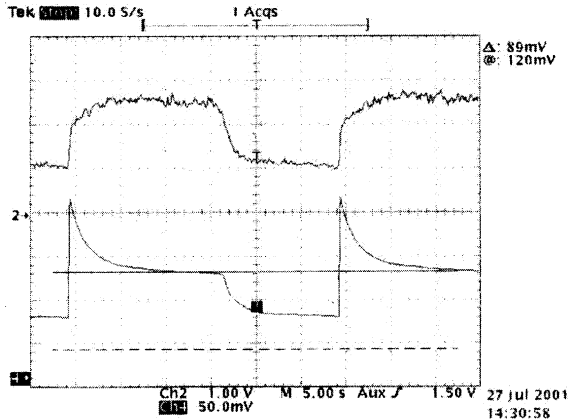


Рис. 3. Ток протонного пучка (нижняя кривая) и интенсивность потока  $H^0$  (нижняя кривая) как функции времени в процессе повторяющихся импульсов инъекции. Показаны два последовательных импульса инъекции. Масштаб по оси времени 5 с/деление, ток протонов 50 мВ/деление = 0.5 мА  $\approx 6 \cdot 10^9$  протонов, темп счета  $H^0$  1 В/деление = 3000 Гц. Пунктирная линия соответствует нулевой интенсивности протонного пучка.

Можно выделить четыре характерных стадии процесса охлаждения инжектированного пучка. В первые 10 секунд охлаждения наблюдается быстрое уменьшение интенсивности пучка (с характерным временем жизни  $\tau \approx 3$  сек), при этом количество охлажденных ионов увеличивается – сигнал датчика нейтральных атомов возрастает. Этот период соответствует охлаждению одной части и потере другой части инжектированного пучка с амплитудами бетатронных колебаний большими, чем радиус электронного пучка. После этого в течение примерно 7 секунд ток пучка и темп генерации атомов водорода остаются

постоянными, что указывает на завершение процесса охлаждения частиц с большими амплитудами колебаний. Через 17 секунд после импульса инъекции следует быстрое ( $\tau \approx 2$  сек) уменьшение интенсивности пучка примерно на 50%.

После этого продолжается относительно медленный распад пучка с характерным временем жизни порядка 10 секунд.

Подобное поведение параметров пучка наблюдалось устойчиво, и длительность всех стадий процесса воспроизводилась с точностью до нескольких сотен миллисекунд. Если потери частиц непосредственно после инъекции связаны с большим радиусом инжектированного пучка, то повторные потери частиц, очевидно, связаны с увеличением фазовой плотности охлаждаемого пучка. Можно предположить, что протонный пучок становится неустойчивым, что и приводит к потерям.

Первой экспериментально обнаруженной особенностью поведения охлажденного пучка были характерные изменения структуры спектра шумового сигнала Шоттки для продольной степени свободы. Сначала, при охлаждении пучка, формируется структура спектра с двумя пиками, соответствующими известному эффекту возникновения в пучке двух встречных волн плазменных колебаний. Такая структура характерна для глубоко охлажденного пучка. Затем, через 8 секунд после импульса инъекции, вновь появляется пик, в точности соответствующий частоте обращения. Его появление вызвано, по-видимому, самогруппировкой пучка.

Одновременно с наблюдением спектра шумов продольной степени свободы наблюдались также и поперечные шумы пучка с помощью векторного анализатора. Появляющийся непосредственно после импульса инъекции слабый сигнал, соответствующий частоте горизонтальных колебаний, через 8 секунд резко увеличивается по амплитуде. Это происходит в точности в момент появления пика в спектре продольных шумов, соответствующего частоте обращения. Затем через 17 секунд после инъекции сигнал горизонтальных колебаний, в течение примерно 0.5 с, затухает, а сигнал, соответствующий частоте вертикальных колебаний, появляется в то же самое время и резко



возрастает по амплитуде. Это соответствует моменту времени, когда начинаются быстрые потери частиц (см. Рис. 3).

Очевидно, что наличие в спектре поперечных шумов Шоттки частот, соответствующих бетатронным колебаниям частиц, вызвано когерентными колебаниями протонного пучка. Развитие этих колебаний во времени наблюдалось так же и по аналоговому сигналу с трех датчиков положения пучка, один из которых использовался для измерения суммового сигнала, два других – разностных сигналов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Появление когерентных сигналов с датчиков в точности соответствовало всем стадиям процесса, наблюдаемым на анализаторе спектра.

Экспериментально наблюдаемая картина развития неустойчивости пока не имеет однозначного объяснения. Момент появления пика на частоте обращения в спектре продольных колебаний и возбуждения когерентных колебаний примерно соответствует характерному времени охлаждения протонного пучка при начальных параметрах, определяемых поперечным и продольным аксептансами накопителя. Однако, какие именно когерентные колебания возникают изначально – горизонтальные или продольные, экспериментально установить не удалось. Потери пучка при перекачке поперечных колебаний из горизонтальной в вертикальную плоскость объясняются существенно меньшей величиной вертикального аксептанса накопителя.

Предельный ток ионов, соответствующий развитию дипольной неустойчивости, пропорционален разбросу частот бетатронных колебаний. Движение пучка ионов остается устойчивым, пока некогерентный сдвиг бетатронной частоты меньше определенного критического значения (зависящего от положения рабочей точки накопителя). Уменьшение разброса частот на некоторой моде свидетельствует о том, что в пучке ионов может развиваться та или иная динамическая неустойчивость. Разброс частот определяется, в основном, следующими факторами:

- разбросом частот обращения,
- хроматичностью накопителя,

- некогерентным сдвигом бетатронных частот, вызванным собственным полем ионного пучка,
- смещением импульса ионов с большими амплитудами бетатронных колебаний от равновесного значения, вызванным провисанием потенциала собственного поля внутри электронного пучка,
- нелинейностью фокусирующих полей, которая в случае применения электронного охлаждения при многооборотной инжекции, в основном, определяется нелинейностью собственных полей электронного пучка.

Для расчета эволюции во времени основных параметров, определяющих устойчивость движения ионов, была использована (с необходимыми модификациями) программа BETACOOI, предназначенная для решения уравнения Ланжевена относительно среднеквадратичных параметров функции распределения частиц в пространстве инвариантов движения при учете различных факторов, влияющих на параметры пучка. Программа BETACOOI была разработана для расчета эффективности применения электронного охлаждения в экспериментах с внутренней мишенью на COSY и использовалась также для расчета динамики процесса охлаждения на ряде других накопителей. В случае охлаждения протонного пучка в COSY основную роль играют два процесса – электронное охлаждение и внутривпучковое рассеяние.

Численный расчет динамики изменения разброса частот поперечных колебаний находится в хорошем соответствии с наблюдаемой в эксперименте картиной развития неустойчивости, и дает близкие, к экспериментально измеренным, значения для характерных времен всех стадий процесса:

Для того, чтобы избежать потерь частиц необходимо обеспечить устойчивость вертикальных колебаний ионов. Временная зависимость разброса частот вертикальных колебаний определяется тремя процессами: уменьшением разброса частот, вызванного нелинейностью поля электронного пучка, уменьшением разброса по импульсу при охлаждении и увеличением некогерентного сдвига частоты при уменьшении эмиттансов пучка. Два первых процесса приводят к уменьшению разброса, третий процесс к его увеличению. Соответственно, характер устойчивости пучка в вертикальной плоскости

определяется соотношением характерных времен охлаждения по различным степеням свободы. Устойчивость вертикальных колебаний может существенно зависеть от начального разброса по импульсу и хроматичности накопителя в вертикальной плоскости. Предварительные эксперименты по исследованию влияния хроматичности на характер устойчивости движения показали, что даже при малом токе возбуждения секступольных линз можно придти к ситуации, когда непосредственно после инъекции развивается вертикальная когерентная неустойчивость, что приводит к быстрой гибели частиц. Следовательно, коррекция хроматичности, необходимая для увеличения времени жизни пучка непосредственно после инъекции (как было показано в Главе 2), должна производиться с учетом требования устойчивости когерентных вертикальных колебаний.

**Четвертая глава** содержит физическое обоснование основных параметров системы электронного охлаждения бустера синхротрона Нуклотрон. Приводится оценка эффективности применения электронного охлаждения и результаты расчетов динамики пучка ионов в процессе охлаждения.

В соответствии с первоначальным проектом инжекционный комплекс Нуклотрона должен включать в себя бустерный синхротрон, линейный ускоритель ионов и несколько типов ионных источников. В настоящее время применяется однооборотная инъекция в Нуклотрон пучка, ускоренного в линейном ускорителе. Максимальная энергия при  $A/Z = 2$  составляет 5 МэВ/нукл. Эмиттанс пучка на выходе линейного ускорителя составляет, примерно, 50 п-мм-мрад в горизонтальной плоскости и 30 п-мм-мрад в вертикальной (что примерно соответствует акцептансу синхротрона), относительный разброс по импульсам – примерно,  $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ . Максимальная частота повторения импульсов инъекции составляет 1 Гц.

Наиболее актуальна проблема повышения интенсивности пучка ионов для экспериментов с поляризованными дейтронами, в виду малой интенсивности источника. Повысить интенсивность пучка дейтронов можно за счет использования бустера с большим акцептансом. Это 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. При использовании бустера необходимо решить проблему перевода пучка в Нуклотрон.

Первый вариант решения этой проблемы предполагает ускорение пучка в бустере до некоторой промежуточной энергии (200 – 400 МэВ/нукл), при которой эмиттанс пучка становится меньше аксептанса Нуклотрона. При этом требуется разработка новой системы инжекции в Нуклотрон. При большей энергии инжектируемого пучка требуются более мощные кикеры. Применение электростатических кикеров требует высокой напряженности поля, а разработка магнитных кикеров, работающих в условиях сверхпроводимости, является непростой технической проблемой.

Второй вариант заключается в использовании электронного охлаждения пучка в бустере. При этом, за время между импульсами инжекции, эмиттанс ионного пучка должен быть уменьшен до величины, позволяющей осуществить его эффективный перевод из бустера в Нуклотрон при помощи существующей системы инжекции.

В данной главе рассматривается режим работы бустера без ускорения, при котором для перевода накопленного пучка в Нуклотрон требуется предварительное уменьшение его эмиттанса. Основные параметры проекта бустера Нуклотрона приведены в Таблице 1. Длина прямолинейной секции, в которой может быть размещена система электронного охлаждения, составляет 6.5 м. Дисперсия в этой секции отсутствует, а бетатронные функции составляют примерно 6 м, но могут быть настроены в соответствии с требованиями оптимального охлаждения.

Требуемое время охлаждения определяется максимальной частотой повторения импульсов инжекции и составляет порядка нескольких секунд. Ввиду больших начальных значений эмиттанса пучка и ограниченного времени охлаждения мощность системы электронного охлаждения должна быть максимально возможной в рамках геометрических ограничений, налагаемых

расположением элементов магнитной системы бустера. В прямолинейной секции кроме системы охлаждения необходимо разместить так же и устройства для компенсации связи между степенями свободы, вносимой соленоидом секции охлаждения (соленоид с противоположным направлением поля или повернутый квадруполь), и корректоры для компенсации искажения орбиты ионного пучка поперечными компонентами магнитного поля на входе и выходе соленоида секции охлаждения. Соответственно, максимально возможная геометрическая длина соленоида может быть выбрана примерно 4.5 - 5 метров. Эффективная длина секции охлаждения (длина участка соленоида с требуемой однородностью магнитного поля) при этом составляет около 4 м.

Таблица 1. Основные проектные параметры бустера синхротрона Нуклотрон.

Энергия инжекции, МэВ/нуклон	5
Длина окружности, м	84
Бетатронные числа $Q_{x,z}$	$\sim 2.75$
Акцептанс, $\mu\text{м}\cdot\text{мрад}$	
горизонтальный	400
вертикальный	225
Частота повторения импульсов инжекции, Гц	1
Период обращения, мксек	2.7

Максимальный ток электронного пучка ограничен эффектами пространственного заряда при его формировании и транспортировке и может составлять до 0.4 А, при этом первеанс пучка примерно равен  $3 \text{ мкА}/\text{В}^{3/2}$ . Такую величину первеанса пучка можно получить в пушке с положительным потенциалом на управляющем электроде. Радиус электронного пучка в секции охлаждения, равный радиусу ионного пучка, заполняющему весь акцептанс бустера, равен 4 см. Для оптимального использования электронного пучка при реальных настройках структуры необходимо иметь возможность плавной регулировки размера электронного пучка в секции охлаждения. Увеличение

радиуса электронного пучка возможно за счет адиабатического уменьшения величины продольного магнитного поля на участке транспортировки пучка от катода до секции охлаждения. Параметры системы электронного охлаждения, определяемые из геометрических и технических ограничений, приведены в Таблице 2. В качестве оценки температуры электронного пучка взяты значения, полученные на пушке с аналогичными параметрами, разработанной группой ИЯФ СО РАН - ОИЯИ для системы охлаждения накопителя LEAR (CERN, Швейцария).

Таблица 2. Основные параметры системы электронного охлаждения

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

Предельно достижимую эффективность системы электронного охлаждения можно оценить в пренебрежении всеми эффектами, приводящими к нагреву пучка. При этом динамику движения можно исследовать в одночастичном приближении: при заданных начальных значениях инвариантов движения частицы необходимо рассчитать их конечные значения через заданный промежуток времени. Расчет выполнялся при помощи программы BETACOOl. На Рис. 4 приведены кривые, соответствующие начальным значениям инвариантов Куранта-Снайдера для дейтрона, при которых, после

фиксированного времени охлаждения, конечные значения не превышают 50  $\pi$ -мм-мрад в горизонтальной плоскости и 30  $\pi$ -мм-мрад в вертикальной. Начальное значение продольного инварианта движения выбиралось соответствующим относительному разбросу по импульсам равному 0.005, радиус электронного пучка 2 см, магнитное поле в секции охлаждения 0.2 Т.

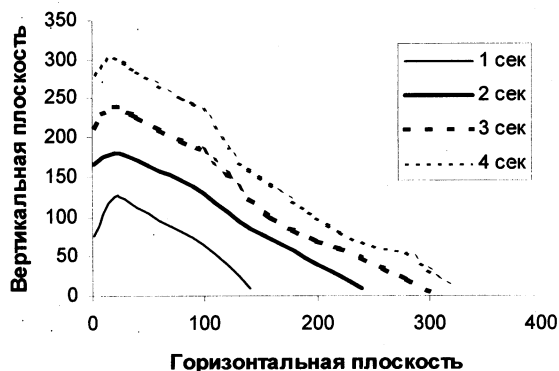


Рис. 4. Начальные значения инвариантов Куранта-Снайдера дейтрона в  $\pi$ -мм-мрад, которые охлаждаются до акцептанса Нуклотрона в течение фиксированного промежутка времени.

В предположении равномерного распределения частиц в пространстве инвариантов движения после инжекции, применение электронного охлаждения в течение 1 секунды позволяет перевести из бустера в Нуклотрон примерно 20% инжектированных в бустер дейтронов. Плотность частиц в фазовом объеме в пределах до 50  $\pi$ -мм-мрад в горизонтальной плоскости и до 30  $\pi$ -мм-мрад в вертикальной увеличивается при этом примерно в 15 раз. Пучок ионов, полностью заполняющий акцептанс бустера, может быть охлажден до требуемой величины эмиттанса примерно за 4 – 5 секунд. Для тяжелых ионов времена охлаждения существенно меньше, т.к. при одинаковом отношении массы к заряду ( $A/Z$ ) величина силы трения возрастает пропорционально ( $Z^2/A$ ).

Ввиду большой величины акцептанса бустера, серьезной проблемой является минимизация шумов, вносимых в накопитель электронным пучком. При малой энергии электронного пучка большую величину тока электронов можно получить лишь в схеме с положительным потенциалом на управляющем электроде электронной пушки. При этом в области управляющего электрода существует ловушечная конфигурация полей для электронов, образующихся при ионизации остаточного газа. Накопление этих электронов приводит к снижению перванса пушки и к изменению во времени тока электронного пучка. Подобный эффект наблюдался на системе электронного охлаждения накопителя LEAR. Эта проблема может быть решена путем использования электронной пушки с разрезным управляющим электродом, в которой в области ускоряющего зазора создается геометрия поля, препятствующая накоплению вторичных электронов.

Большая величина тока электронного пучка и низкая энергия ионов накладывают дополнительные ограничения на выбор рабочей точки и другие параметры бустера. Провисание потенциала собственного поля электронного пучка приводит к тому, что ионный пучок, заполняющий весь поперечный акцептанс накопителя, имеет разброс по продольному импульсу от 0 до примерно +2%, ввиду того, что ионы охлаждаются до энергии электронов усредненной по радиальным колебаниям ионов. Соответственно, хроматичность накопителя должна определяться условием положения рабочей точки в зоне устойчивости для всех амплитуд бетатронных колебаний. Смещение частот бетатронных колебаний при максимальном токе электронного пучка за счет его собственного поля составляет примерно 0.4 в вертикальной плоскости и 0.2 в горизонтальной. Соответственно, магнитная система бустера должна обеспечивать возможность динамической перестройки положения рабочей точки в таком диапазоне изменения частот. 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.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

## **Выводы**

В ходе выполнения работы были экспериментально исследованы причины ограничения интенсивности пучка ионов в накопителе COSY. Показано, что предельная интенсивность ограничивается двумя основными процессами: сокращением времени жизни инжектированных ионов в присутствии электронного пучка и потерями ионов в охлажденном пучке.

Показано, что 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. В частности, рабочая точка накопителя COSY расположена вблизи зоны резонанса связи, что при большой величине хроматичности в горизонтальной плоскости и наличии дисперсии в секции охлаждения может приводить к параметрической раскачке вертикальных колебаний части инжектированных ионов и, как следствие, к сокращению времени жизни инжектированного пучка. Параметрическая раскачка колебаний вызвана нелинейностью фокусирующих полей и, в первую очередь, нелинейностью собственного поля электронного пучка, которая существенно влияет на динамику движения ионов из-за того, что непосредственно после инжекции размеры ионного пучка в секции охлаждения в несколько раз превышают радиус электронного пучка. Для накопителя COSY предложены пути повышения времени жизни инжектированных ионов.

Экспериментально обнаружено, что потери частиц в охлажденном ионном пучке в накопителе COSY вызваны развитием когерентных бетатронных колебаний пучка, что не позволяет устойчиво накапливать ионы до предела по пространственному заряду. Детально исследована динамика развития этой неустойчивости и дана ее интерпретация с помощью численного моделирования

процесса охлаждения. Для подавления потерь частиц при развитии неустойчивости было предложено использовать систему обратной связи по вертикальной степени свободы. (В последней серии экспериментов в июне 2003 года такая система была введена в действие, и в режиме многократного повторения импульсов инъекции интенсивность накопленного пучка была доведена примерно до  $10^{11}$  протонов при устойчивом процессе накопления.)

Таким образом, проектирование системы электронного охлаждения для формирования пучка ионов в накопителях с многооборотной перезарядной инъекцией является не только технической, но и ускорительной задачей. Выбор параметров накопителя и системы охлаждения должны осуществляться согласованно.

На основе анализа экспериментальных результатов сформулированы основные требования на параметры бустера синхротрона Нуклотрон и его системы электронного охлаждения, позволяющие избежать отрицательных последствий при применении охлаждения и устойчиво накапливать ионы до предела по пространственному заряду. Показано, что применение электронного охлаждения позволяет осуществить эффективный перевод пучка в Нуклотрон без его ускорения в бустере. Это упрощает и удешевляет конструкцию бустера и системы инъекции пучка в Нуклотрон.

**Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (пп. 1, 2, 3), трудах конференций (пп. 4, 5), в годовых отчетах исследовательского центра Юлих (пп. 6, 7):**

1. Штайн Й., Прасун Д., Штокхорст Х., Дитрих Ю., Фан К., Камерджиев В., Майер Р., Мешков И.Н., Сидорин А.О., Пархомчук В.В., Текущее состояние электронного охлаждения на COSY (Юлих, Германия). Атомная энергия, т. 94, вып.1, январь 2003, стр. 57 – 59.
2. I.Meshkov, Y.Korotaev, A.Sidorin, A.Smirnov, E.Syresin, “Experimental study of structure and stability of an intense neutralized electron beam”, NIM A, v.441(2000), Nos 1-2, pp.96 - 99.

3. I.Meshkov, Y.Korotaev, A.Sidorin, A.Smirnov, E.Syresin, I. Titkova, "High perveance electron gun for the electron cooling system", NIM A v.441(2000), Nos 1-2, pp.92 - 95.
4. V. Mikhailov, A. Butenko, I. Issinsky, H. Khodzhibagiy, A. Kovalenko, I. Meshkov, V. Monchinsky, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, V. Volkov, V. Anguelov, D. Dinev, Progress in the Nuclotron Booster Design, Proceedings of EPAC2002, Paris. 2002, pp. 596 – 598.
5. H. J. Stein, D. Prasuhn, H. Stockhorst, K. Fan, J. Dietrich, V. Kamerdjiev, R. Maier, I.N. Meshkov, A. Sidorin. V.V. Parkhomchuk, Present performance of electron cooling at COSY-Juelich, Труды XVIII Российской конференция по ускорителям заряженных частиц (РупАК – 2002), Обнинск, 2002, в печати.
6. A. Sidorin, I.N. Meshkov, H.J. Stein, H. Stockhorst, , Natural Neutralization in the Electron Beam of the COSY Electron Cooler, IKP Annual Report 2001, set <http://www.fz-juelich.de/ikp/publications/AR2001>.
7. I.N. Meshkov, J. Dietrich, V.S. Kamerdjiev, R. Maier, V.V. Parkhomchuk2, D. Prasuhn, A. Sidorin, H.J. Stein, H. Stockhorst, J.-D. Witt, Observation of Instabilities of Electron Cooled Proton Beams, IKP Annual Report 2001, set <http://www.fz-juelich.de/ikp/publications/AR2001>.

Получено 21 августа 2003 г.

*Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 25.08.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,68. Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 100 экз. Заказ № 54057.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)