

Обзор докладов, представленных на VIII Всероссийском семинаре "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики", свидетельствует о высоком уровне теоретических работ в области электронной оптики, успешном развитии разработок новых электронно- и ионно-

оптических приборов и устройств для научных исследований и технологий, в том числе нанотехнологий.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 года.

The VIII All-Russian seminar "Problems of theoretical and applied electron and ion optics"

A. M. Filachev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The review of the basic reports on electron and ion optics is presented in the article, which is devoted to results of the 8-th All-Russian seminar in Moscow on May, 29—31, 2007.

УДК 621.384.6

Формирование и устойчивость охлажденных интенсивных пучков в синхротроне при энергии инжекции

Е. М. Сыресин

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

К. Нода

Национальный институт радиологических наук, г. Чибо, Япония

Для формирования интенсивных ионных пучков в синхротронах в качестве одной из наиболее распространенных схем инжекции используется схема с электронным охлаждением и накоплением. Максимальная интенсивность формируемых ионных пучков определяется временем жизни ионов в синхротроне, а также эффективностью их охлаждения и накопления. Формирование высокоинтенсивных охлажденных ионных пучков ограничено развитием неустойчивости, приводящей к значительному снижению времени жизни ионов. В работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований и расчетов по формированию и устойчивости высокоинтенсивных охлажденных ионных пучков в синхротронах при энергии инжекции.

Метод электронного охлаждения [1—2], впервые предложенный и реализованный в Институте ядерной физики (г. Новосибирск), позволил использовать технику стекирования, изначально применяемую для накопления частиц в электронных синхротронах, для формирования интенсивных ионных пучков. Для увеличения тока в ионных синхротронах в 5—50 раз, по сравнению с инжекционным током, применяется инжекция с электронным охлаждением и накоплением частиц. Она эффективно используется на накопительных кольцах и в синхротронах, в частности на LEIR [3], ESR [4], COSY [5], HIMAC [6, 7], S-LSR [8].

При многооборотной инжекции новая порция ионов инжектируется в накопительное кольцо с

большим горизонтальным эмиттансом. За счет электронного охлаждения амплитуда бетатронных колебаний инжектированных ионов уменьшается, и в освободившееся пространство запускается следующая порция ионов. Электронное охлаждение обеспечивает автоматическое стекирование ионов, в результате чего их ток растет во времени (рис. 1).

При инжекции равновесная орбита накопленных ионов смещена в горизонтальном направлении на некоторое расстояние относительно септума, и вновь инжектированные ионы совершают бетатронные колебания относительно равновесной орбиты. Минимальный зазор между септумом и равновесной ионной орбитой определяет акцеп-

танс для накопленных ионов. Расстояние между равновесной орбитой накопленных ионов и септумом изменяется при многооборотной инжекции, в результате чего происходит заполнение фазового пространства в горизонтальном направлении. Если в ходе охлаждения амплитуда бетатронных колебаний вновь инжектируемых ионов оказывается меньше, чем горизонтальный зазор между септумом и равновесной орбитой, они захватываются в стек. В противном случае инжектируемые ионы гибнут на септуме при следующем цикле инжекции, когда равновесная орбита накопленных ионов возвращается в начальное положение.

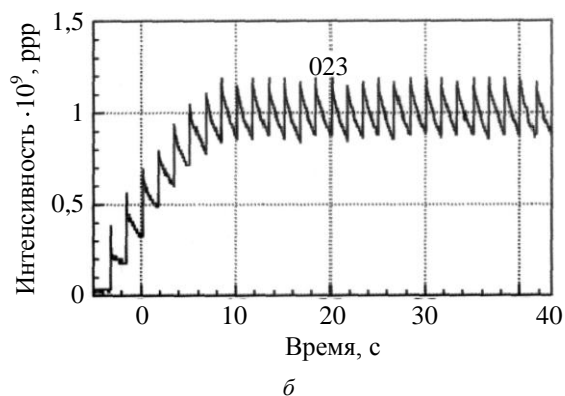
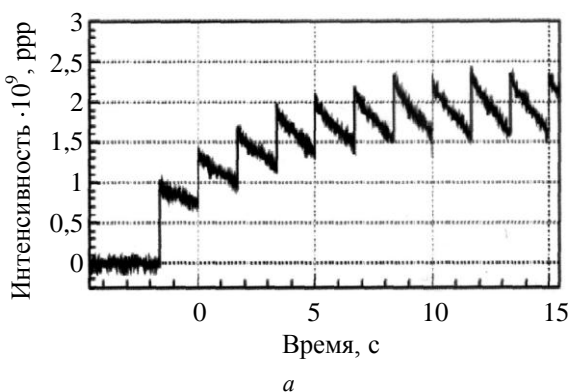


Рис. 1. Зависимость числа накопленных ионов Ar^{18+} на НИМАС от времени:

а — $I = 120$ мА, $R = 2$, $T_{inj} = 1,65$ с, $\tau_{chop} = 225$ мкс;
 б — $I_e = 150$ мА, $R = 3,3$, $T_{inj} = 1,65$ с

Эффективность инжекции характеризуется двумя параметрами: эффективностью охлаждения и коэффициентом накопления.

Эффективность охлаждения определяется отношением числа ионов, охлажденных за период инжекции до аксептанса, доступного для ионного стека, к полному числу ионов, инжектированных в кольцо в результате многооборотной инжекции. Скорость электронного охлаждения существенным образом зависит от тока электронного пучка. Эффективность охлаждения возрастает с увеличением тока электронного пучка. Однако поперечные неустойчивости ограничивают формирование

интенсивных охлажденных пучков ионов. Таким образом, проблема формирования интенсивных ионных пучков при энергии инжекции тесно связана с проблемой их устойчивости.

Коэффициент накопления ионов определяется отношением времени жизни ионов к периоду инжекции. Время жизни ионов определяется их взаимодействием с остаточным газом в вакуумной камере синхротрона. Оно зависит также от поперечной диффузии ионов, возникающей при формировании интенсивных ионных пучков. Из-за поперечной диффузии время жизни вновь инжектируемых ионов, имеющих большие амплитуды бетатронных колебаний, обычно ниже, чем время жизни глубоко охлажденных ионов, захваченных в стек. Вновь инжектируемые ионы теряются в вертикальном направлении, так как вертикальный аксептанс синхротрона обычно в несколько раз меньше, чем горизонтальный. Снижение времени жизни ионов приводит в конечном итоге к уменьшению их интенсивности в синхротроне. При развитии неустойчивости время жизни ионов резко снижается, а эффективность инжекции падает.

Ниже приводятся результаты экспериментов и расчетов по ионной инжекции с охлаждением и накоплением, а также устойчивость охлажденных ионных пучков. Основная часть обсуждаемых экспериментов выполнена на медицинском синхротроне НИМАС [7].

Параметры инжекции на НИМАС

НИМАС — медицинский ионный синхротрон с электронным охлаждением Национального института радиологических наук (Япония) [7]. Цель экспериментов — развитие ускорительной техники для реализации раковой терапии ионными пучками и прежде всего ионами углерода [9]. Величины основных параметров синхротрона НИМАС и инжектированных пучков приведены ниже.

Синхротрон	
Периметр, м.....	129
Давление, Торр.....	10^{-10}
Аксептанс, π -мм·мрад/с.....	264/30
Число:	
инжектируемых ионов $\cdot 10^8$, ppp.....	2—10
накопленных ионов $\cdot 10^9$, ppp.....	0,5—2,5
Тип ионов.....	Ar^{18+}
Энергия инжекции, МэВ/н.....	6
Бетатронные частоты Q_x/Q_y	3,69/3.13
Период:	
обращения, мкс.....	4
следования инжекции, с.....	1; 1,65; 3,3
Время жизни ионов, с.....	8—10
Бета-функции, м:	
монитора β_x/β_y	9/7
системы охлаждения β_x/β_y	9,9/10,7
инжекции β_x/β_y	14,1/4,4

Система электронного охлаждения

Ток электронного пучка, мА.....	25—150
Диаметр катода, мм.....	35
Пробочное отношение	1,7—3,8
Поле соленоида в секции охлаждения, Т...	0,05
Длина соленоида, м.....	1,2

Интенсивность инжектированных пучков составляет $(0,2—1) \cdot 10^9$ частиц за импульс (см. рис. 1). Максимальное число накопленных ионов равно $2,5 \cdot 10^9$. Максимальное число частиц, накопленных в НИМАС, ограничено развитием неустойчивости интенсивного ионного пучка и снижением времени жизни вновь инжектируемых ионов. Максимальный эмиттанс пучка при многооборотной инжекции составляет $260 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в горизонтальном направлении и $10 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ — в вертикальном.

Горизонтальный эмиттанс и число вновь инжектируемых частиц снижаются при сокращении длительности импульса многооборотной инжекции.

Поперечные размеры интенсивных ионных пучков измерены газовым монитором [10]. Когерентные моды дипольных колебаний накопленных ионов и возмущения замкнутой орбиты ионного пучка получены с помощью пикап-электродов. Эксперименты по инжекции с электронным охлаждением выполнены преимущественно с ионами аргона Ar^{18+} при энергии 6 МэВ/н.

Эффективная длина секции охлаждения НИМАС составляет 1 м, магнитное поле в секции охлаждения — $H = 0,5 \text{ кГн}$, а в области пушки H_{gun} оно варьируется в зависимости от пробочного отношения $R = H_{\text{gun}}/H$.

Накопление ионов при инжекции в синхротрон с электронным охлаждением

Эффективность охлаждения

Для увеличения интенсивности ионов в синхротроне [11] используется многооборотная инжекция, в результате которой ионы обладают большим горизонтальным эмиттансом. Электронное охлаждение приводит к затуханию бетатронных колебаний ионов, что уменьшает поперечный размер ионного пучка (рис. 2, а).

Эффективность охлаждения характеризуется отношением амплитуд бетатронных колебаний вновь инжектируемых ионов для первого и второго циклов инжекции (см. рис. 1 и рис. 2, б). Эффективность охлаждения η на НИМАС составляет 50 % при токе электронного пучка 25 мА, с ростом тока она приближается к 100 %.

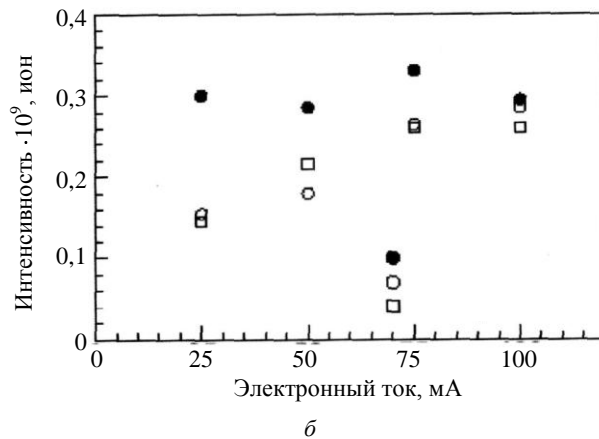
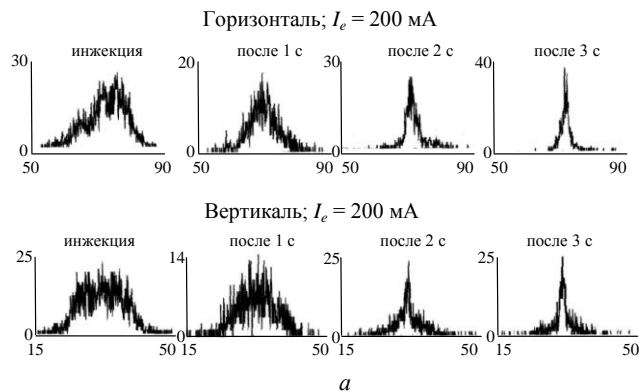


Рис. 2. Охлаждение и накопление ионного пучка:
а — поперечный размер пучка при охлаждении;
б — рост числа ионов за:
■ — 1-й, ○ — 2-й, □ — 3-й циклы инжекции

Потери ионов на септуме

Максимальный зазор между септумом и равновесной орбитой накопленных ионов для НИМАС составляет 65 мм. Интенсивность накопленных ионов при инжекции с электронным охлаждением зависит от оптимального выбора зазора (расстояния) между септумом электростатического дефлектора и их равновесной орбитой. При малом зазоре происходят потери накопленных ионов, если амплитуда их бетатронных колебаний сравнима с этим зазором. При увеличении зазора между септумом и равновесной орбитой происходит увеличение амплитуды бетатронных колебаний для вновь инжектируемых ионов, в результате чего время их охлаждения увеличивается. Ионы с большой амплитудой бетатронных колебаний не успевают охладиться до размера, соответствующего зазору между септумом и равновесной орбитой. При следующем цикле инжекции эти ионы гибнут на септуме при возвращении равновесной орбиты в исходное состояние. Таким образом, существует оптимальный начальный зазор между септумом и равновесной орбитой, при котором интенсивность накопленных ионов достигает максимума (рис. 3).

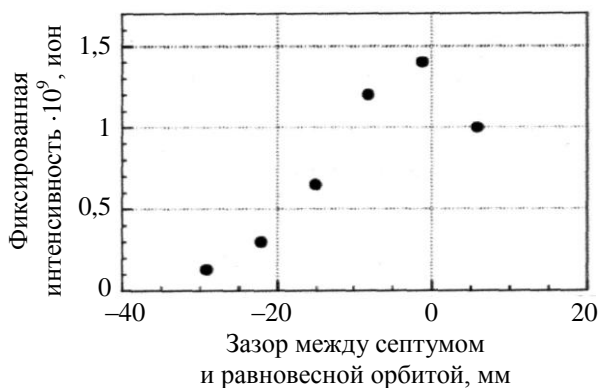


Рис. 3. Зависимость интенсивности накопленных ионов от смещения орбиты инжекции

Таким образом, эффективность электронного охлаждения характеризуется величиной потерь ионов на ноже септума за один цикл инжекции. При оптимальном выборе положения равновесной орбиты не происходит заметных потерь накопленных ионов на септуме, а вновь инжектируемые ионы успевают охладиться до малых бетатронных амплитуд и не теряются при возвращении равновесной орбиты в следующем цикле инжекции. Длительность импульса инжекции выбирается такой, чтобы при оптимальном положении септума значительная часть вновь инжектируемых ионов успела охладиться за время между импульсами инжекции.

Коэффициент накопления

Наряду с быстрыми потерями ионов на септуме существуют также медленные потери ионов, обусловленные их взаимодействием с атомами остаточного газа в вакуумной камере и диффузией в поперечном направлении из-за различных механизмов их нагрева.

Коэффициент накопления $G = N_{st}/N_{inj}$ характеризуется отношением числа накопленных ионов N_{st} к числу вновь инжектируемых ионов N_{inj} за цикл инжекции. Он зависит от времени жизни ионов в синхротроне, периода инжекции T_{inj} , а также от эффективности охлаждения η . Времена жизни глубоко охлажденных ионов стека $\tau_{st-life}$ и вновь инжектируемых ионов $\tau_{inj-life}$ с большой амплитудой бетатронных колебаний обычно отличаются различной величиной поперечной диффузии. Коэффициент накопления ионов в стационарном режиме после большого числа циклов инжекции равен [12]

$$G = 1 + \frac{\eta \cdot \exp(-T_{inj} / \tau_{inj-life})}{1 - \exp(-T_{inj} / \tau_{st-life})}$$

Уменьшение эффективности охлаждения и снижение времени жизни вновь инжектируемых

ионов по сравнению со временем жизни накопленных ионов приводят к заметному снижению коэффициента накопления ионов G .

Время жизни ионов

Время жизни полностью ободранных ионов при энергии инжекции определяется их взаимодействием с атомами остаточного газа и обусловлено подхватом электрона. Время жизни для полностью ободранных ионов обычно на порядок меньше времени жизни голых ядер, поскольку сечение обдирки электрона на порядок выше сечения его подхвата при энергии ионов несколько МэВ/н. Время жизни ионов Ar^{18+} в НИМАС составляет 8—10 с при давлении 10^{-10} Торр (рис. 4), время жизни ионов зависит от концентрации примесей тяжелых газов в вакуумной камере синхротрона. Рост концентрации примесей тяжелых газов, таких как CO и H₂O, на несколько процентов приводит к заметному снижению времени жизни ионов.



Рис. 4. Зависимость времени жизни накопленных и вновь инжектируемых ионов от их интенсивности при $T_{inj} = 1,65$ с, $R = 2$ и $I = 125$ мА:
◆ — вброс (инжекция) ионов; ■ — уход (распад) ионов

Время жизни вновь инжектируемых ионов для НИМАС равно 4—5 с. Оно определяется как взаимодействием ионов с атомами остаточного газа, так и дополнительным диффузионным уходом, возникающим из-за присутствия шумов в высокоинтенсивных ионных пучках. Влияние диффузионного ухода для вновь инжектируемых ионов существенно выше, чем для накопленных ионов вследствие разницы амплитуд их бетатронных колебаний и эффективности охлаждения. В результате на НИМАС время жизни вновь инжектируемых ионов в 1,5—2 раза ниже времени жизни накопленных ионов.

Эффекты, связанные с возмущениями замкнутой орбиты, также влияют на время жизни ионов. Так, для НИМАС вертикальные возмущения замкнутой орбиты составляют $-5 \div +2$ мм, их рост приводит к снижению времени жизни ионов.

Равновесный поперечный размер стека

Равновесный поперечный размер пучка накопленных ионов на НИМАС определяется электронным охлаждением и внутривпучковым рассеянием при интенсивности ионов, меньшей чем 10^8 частиц (рис. 5). При наличии такого равновесия произведение горизонтального X и вертикального Y размеров пучка нелинейно зависит от интенсивности частиц $N^{2/5}$ (см. рис. 5). При увеличении интенсивности ионов произведение поперечных размеров стека $X \cdot Y$ растет по линейному закону, так что плотность ионов в нем остается неизменной. Переход от закона $X \cdot Y \propto N^{2/5}$ к линейной зависимости $X \cdot Y \propto N$ обусловлен нагревом ионов, в результате которого равновесные размеры стека растут при сохранении критической плотности ионов. Диффузия приводит к снижению времени жизни ионов стека, когда его поперечные размеры сравниваются с вертикальной апертурой вакуумной камеры или с горизонтальным зазором между септумом и равновесной орбитой.

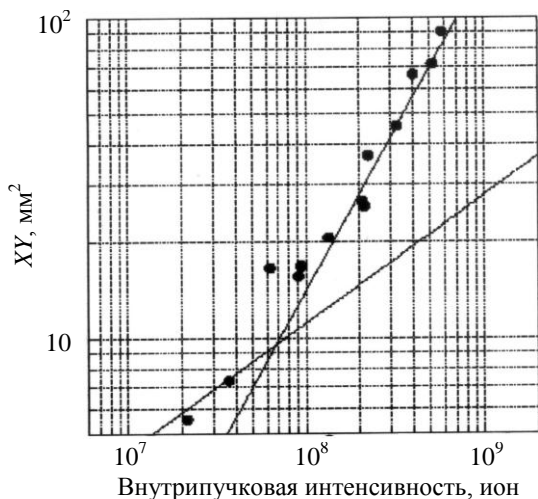


Рис. 5. Зависимость поперечного равновесного размера от интенсивности ионов:

— соотношение $XY/N = 1,110^{-7} \text{ мм}^2$
и $XY/N^{2/5} = 0,017 \text{ мм}^2$

Поведение равновесных размеров стека в зависимости от числа частиц [13], как и разница между временами жизни вновь инжектируемых и накопленных ионов [7], указывают на наличие нагрева ионов на НИМАС.

Эксперименты по накоплению ионов на НИМАС

Зависимость количества накопленных ионов при инжекции с электронным охлаждением показана на рис. 1. Количество накопленных ионов определяется интенсивностью инжектированного пучка, эффективностью охлаждения и коэффициентом накопления ионов. Количество ионов, ин-

жектированных за цикл, линейно растет с длительностью многооборотной инжекции, причем растет и горизонтальный эмиттанс вновь инжектируемых ионов. В результате ионы с большими бетатронными амплитудами не успевают охладиться за цикл инжекции и теряются на септуме при начале следующего цикла. Эффективность охлаждения составляет около 65 % (см. рис. 1, а) при длительности импульса инжекции 225 мкс, а количество инжектированных ионов за цикл составляет 10^9 частиц. При такой эффективности охлаждения времена жизни для вновь инжектируемых частиц и накопленных ионов равны, соответственно, 4 и 8 с (см. рис. 4). Коэффициент накопления ионов равен $G = 2,5$ и согласуется с данными эксперимента (см. рис. 1, а), в результате чего интенсивность накопленных ионов на НИМАС составила $2,5 \cdot 10^9$ частиц. При снижении длительности импульса инжекции и, соответственно, эмиттанса и количества инжектированных частиц их эффективность охлаждения становится близкой к 100 %, а коэффициент накопления ионов увеличивается до $G = 5$ (см. рис. 1, б). При инжекции $2,5 \cdot 10^8$ частиц количество накопленных ионов составляет $1,2 \cdot 10^9$.

При фиксированной длительности многооборотной инжекции эффективность охлаждения и, соответственно, количество накопленных ионов растут с ростом тока электронного пучка (рис. 6, а) [7].

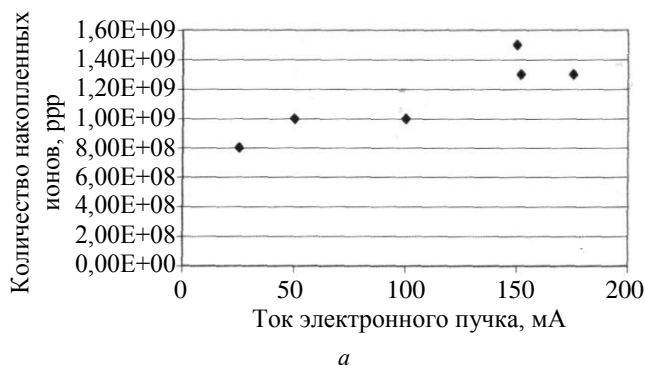


Рис. 6. Зависимость интенсивности накопленных ионов от тока электронного пучка и периода инжекции: а — $R = 3,3$ и $T_{inj} = 1,65 \text{ с}$; б — $I_e = 100 \text{ мА}$ и $R = 3,3$

С увеличением периода следования импульсов инжекции снижается количество накопленных ионов (см. рис. 6, б) [7].

Расчеты накопления ионов в синхротроне с электронным охлаждением

Расчеты накопления ионов в синхротронах с электронным охлаждением проведены с использованием пакета программ Betacool [14] с учетом охлаждения ионов, их внутривидового рассеяния, взаимодействия ионов с атомами остаточного газа в вакуумной камере синхротрона, эффектами нагрева и диффузии ионов под действием шумов, возникающих в интенсивных ионных пучках, ионных потерь на септуме электростатического инфлектора, потерь частиц, уходящих за аксептанс синхротрона.

Зависимость количества накопленных ионов от времени при инжекции и распаде стека с выключенной инжекцией показано на рис. 7. Результаты расчетов, представленных на рис. 7, совпадают с результатами экспериментов, приведенных на рис. 1, а. В расчетах наряду с взаимодействием ионов с остаточным газом, учитывается также дополнительный нагрев ионов, приводящий к росту эмиттанса со скоростью $\dot{\epsilon}_v/\dot{\epsilon}_h = 4/2 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}/\text{с}$. Времена жизни для накопленных и вновь инжектируемых ионов отличаются в два раза как из-за присутствия нагрева, так и разных темпов охлаждения для них (см. рис. 3). Измерения поперечных размеров и интенсивности стека вместе с данными расчетов позволили выделить диффузионные темпы нагрева ионов на НИМАС.

Устойчивость охлажденных ионных пучков

Экспериментальные исследования устойчивости охлажденных ионных пучков

Неустойчивость охлажденных ионных пучков в синхротроне возникает при высоких плотностях

электронных и ионных пучков. Впервые такая неустойчивость была зарегистрирована в экспериментах на CELSIUS [15], позднее ее исследовали в экспериментах на SIS [16], COSY [5, 17], НИМАС [6, 7] и ряде других синхротронах с электронным охлаждением. Источниками быстрых потерь ионов или так называемого "электронного нагрева" в этих экспериментах были нелинейные поля электронного пучка [15] и когерентные колебания ионов [18].

Возникновение неустойчивости характеризуется резким возрастанием амплитуды когерентных вертикальных колебаний ионов. Частоты вертикальных бетатронных колебаний соответствуют гармоникам вертикального бетатронного числа. Динамика когерентных колебаний экспериментально исследована на COSY [5]. Для НИМАС амплитуда вертикальных когерентных колебаний соответствует 10 мм [6]. При небольшом вертикальном аксептансе синхротрона это приводит к потерям ионов в этом направлении (рис. 8, а).

Поперечная неустойчивость в экспериментах на НИМАС зависит от выбора рабочей точки. Пороговый электронный ток, при котором развивается неустойчивость, соответствует 140 мА при пробочном отношении $R = 2$. Амплитуда колебаний быстро нарастает при приближении к разностному $Q_x - Q_y = n$ или суммовому $Q_x + Q_y = m$ резонансам [19]. Отметим, что в экспериментах на НИМАС была зарегистрирована заметная асимметрия между амплитудой вертикальных когерентных колебаний при приближении к разностному $Q_x - Q_y = 1$ (см. рис. 8, а) и суммовому $Q_x + Q_y = 7$ (см. рис. 8, б) резонансам [6, 7]. Амплитуда когерентных колебаний при отстройке на δQ от разностного резонанса значительно выше, чем амплитуда бетатронных колебаний при той же отстройке для суммового резонанса (см. рис. 8). Это обстоятельство было обнаружено при проведении расчетов

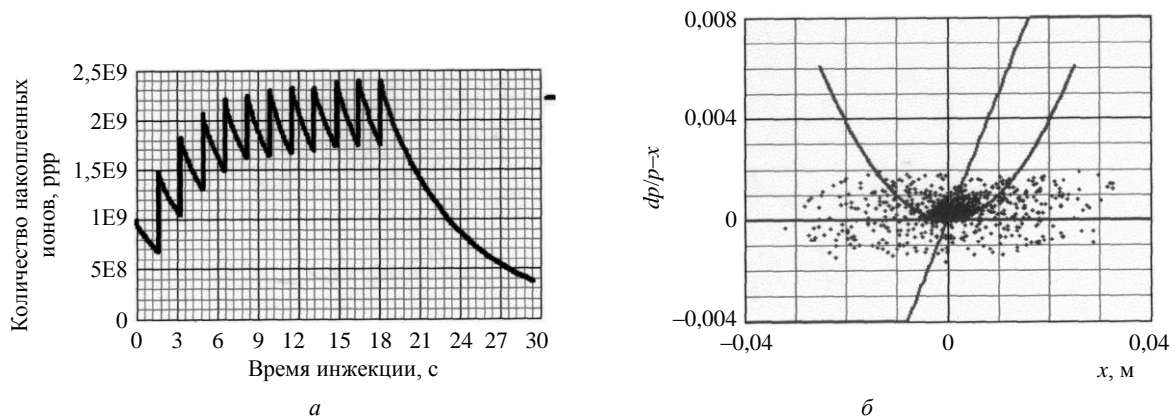


Рис. 7. Зависимость интенсивности ионов от времени при $I=120 \text{ мА}$, $R = 2$ и $\dot{\epsilon}_v/\dot{\epsilon}_h = 4/2 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}/\text{с}$: а — интенсивность ионов от времени; б — распределение ионов $dp/p - x$

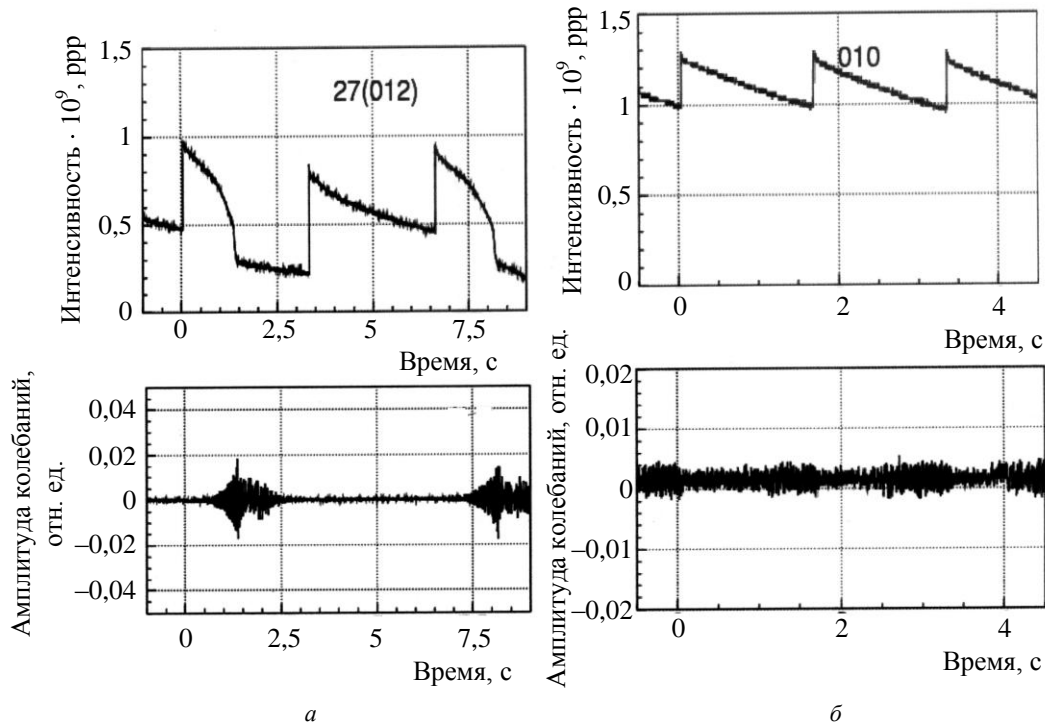


Рис. 8. Зависимость интенсивности накопленных ионов и амплитуды вертикальных когерентных колебаний от времени:
 а — $Q_x/Q_y = 3,7/2,88$; $I_e = 150$ мА и $R = 3,3$; б — $Q_x/Q_y = 3,69/3,13$; $I_e = 150$ мА и $R = 3,3$

поперечной неустойчивости [6] и позднее подтверждено экспериментально [6, 7]. В результате проведенных расчетов и экспериментов на НИМАС была выбрана рабочая точка с $Q_x/Q_y = 3,69/3,13$.

Расчеты поперечной неустойчивости охлажденных ионных пучков

Поперечная неустойчивость при инжекции в синхротрон с электронным охлаждением связана с так называемым явлением "электронного нагрева" [15]. Пространственный заряд электронного пучка и продольное магнитное поле секции охлаждения осуществляют связь между вертикальными и горизонтальными дипольными когерентными колебаниями ионов. Амплитуда поперечных колебаний ионов возрастает пороговым образом, когда произведение плотностей электронов и охлажденных ионов достигает некоторой критической величины [18, 19].

Поперечное движение центров гравитации электронного и ионного пучков в секции электронного охлаждения описывается уравнениями [19—21]

$$\ddot{z} + i\omega_c \dot{z} + \omega_i^2 z = \omega_i^2 z_e; \quad \dot{z}_e + i\omega_d z_e = i\omega_d z$$

при начальных условиях $z, \dot{z}, z_e, \dot{z}_e = z_0, \dot{z}_0, 0, 0$ при $t = 0$.

Здесь $z = x + iy$ — координаты центров гравитации в поперечном направлении ионного и электронного (z_e) пучков;

$\omega_c = z_e B / \gamma m_i$ — циклотронная частота ионов;

$\omega_i^2 = z_e^2 n_e / 2\epsilon_0 \gamma m_i$ — плазменная частота ионов;

$\omega_d = \omega_e^2 / \omega_{ce}$ — дрейфовая частота электронов;

$\omega_e^2 = z_e^2 n_i / 2\epsilon_0 \gamma^3 m_e$ — плазменная частота электронов;

и

$\omega_{ce} = eB / \gamma m_e$ — циклотронная частота электронов;

B — магнитное поле в секции охлаждения;

n_e и n_i — плотности электронов и ионов, соответственно.

Когерентное движение ионов может быть представлено в матричной форме $X = M_{ring} X_0$ [19],

где $M_{ring} = L_{dr}^{-1} R_{Twiss} L_{dr}^{-1} M_{sol}^{-1} M_{cool} M_{sol}$ — матрица, соответствующая одному обороту ионов в синхротроне;

L_{dr} — матрица секции дрейфа с длиной, равной половине длины секции охлаждения;

R_{Twiss} — матрица синхротрона при выключенной системе охлаждения;

M_{sol} — матрица солениода секции охлаждения;

M_{cool} — матрица секции охлаждения (ее особенность заключается в том, что она соответствует неустойчивому движению ионов, поскольку $|M_{cool}| \neq 1$ [19]).

Четыре собственных числа ($\lambda_{1,2,3,4}$) соответствуют инкрементам нарастания и декрементам за-

тухания в единицах частоты обращения ионов. Две дипольные моды возбуждаются с инкрементом γ_1 и декрементом γ_2 и имеют резонансный характер (в условиях эксперимента НИМАС при линейных резонансах $Q_x - Q_y = 1$ и $Q_x + Q_y = 7$). Расчетный инкремент неустойчивости вблизи резонансов связи пропорционален произведению плотностей электронного и ионного пучков $\gamma \propto n_e \cdot n_i$ [19]. Нарастающая и затухающая моды трансформируются одна в другую при переходе через линейные резонансы и резонансы высоких порядков, где происходит смена знаков у γ_1 и γ_2 (рис. 9).

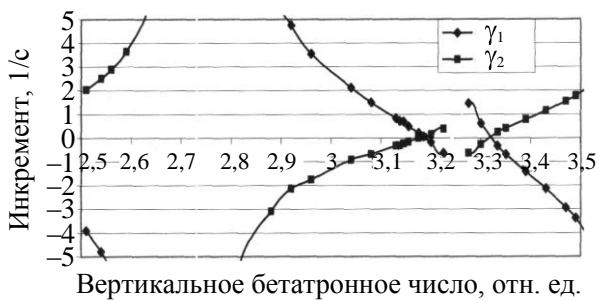


Рис. 9. Расчетная зависимость инкремента (прироста) когерентных дипольных колебаний ионов от вертикального бетатронного числа при $Q_x = 3,275$; $I_e = 150$ мА; $N_i = 10^9$ частиц

Отметим, что инкремент нарастания неустойчивости для разностного резонанса $Q_x - Q_y = 1$ значительно превосходит инкремент нарастания для суммового резонанса (см. рис. 9) [6, 7]. В связи с этим при некотором фиксированном значении горизонтального бетатронного числа для НИМАС, равного $Q_x \approx 3,7$, вертикальное бетатронное число должно быть выбрано вблизи суммового линейного резонанса и отстроено от резонансов более высоких порядков. В результате расчетов на НИМАС было выбрано вертикальное бетатронное число $Q_y = 3,13$, отстроенное от резонанса третьего порядка $2Q_y + Q_x = 10$ ($Q_y = 3,1375$).

Наряду с первичными ионами, циркулирующими в синхротроне, при определенных условиях могут присутствовать вторичные ионы, образующиеся в секции охлаждения при ионизации атомов остаточного газа электронным пучком. Так, в условиях экспериментов НИМАС [22, 23] и COSY [24] благодаря разным диаметрам вакуумной камеры в секциях охлаждения, коллектора и пушки образуется ловушка для накопленных вторичных ионов с уровнем концентрации порядка 20 % от концентрации электронного пучка. Согласно расчетам [25] наличие вторичных ионов в секции охлаждения приводит к дополнительному росту ин-

кремента неустойчивости первичного ионного пучка, циркулирующего в синхротроне.

Методы подавления поперечной неустойчивости охлажденных ионных пучков

Методы подавления дипольной неустойчивости при оптимально выбранной рабочей точке в основном направлены на снижение плотностей охлажденных ионов и электронов, поскольку инкремент нарастания неустойчивости линейно растет с их увеличением $\gamma \propto n_e \cdot n_i$.

Как правило, эти методы связаны с некоторым диффузионным нагревом ионов и увеличением поперечных размеров ионного пучка, что помогает избежать быстрых потерь при развитии неустойчивости. Эти методы обычно приводят к некоторому снижению времени жизни ионов. Оптимальным для накопления ионов являются режимы, при которых удается избежать быстрых потерь ионов, а применяемые методы подавления неустойчивости не приводят к заметному снижению времени жизни ионов. Реализация систем обратной связи — один из наиболее эффективных методов подавления поперечной неустойчивости охлажденных ионных пучков. Поскольку инкремент дипольной неустойчивости растет с увеличением концентрации вторичных ионов в секции охлаждения, то различные методы по их удалению приводят к стабилизации первичных ионных пучков или позволяют повысить их интенсивность.

Подавление поперечной дипольной неустойчивости ВЧ-квадруподем

Одним из методов, применяемых на НИМАС, для подавления поперечной дипольной неустойчивости является метод с использованием высокочастотного квадруполя, применяемого обычно для медленного вывода модулированного по току ионного пучка. Применение ВЧ-квадруполя [7, 26] при частоте 825 кГц, немного сдвинутой по отношению к соответствующей гармонике вертикальных бетатронных колебаний на частоте 814 кГц, приводит к снижению амплитуды когерентных вертикальных колебаний (рис. 10, а). Напряжение на ВЧ-квадруполе составляет 1 В, что соответствует отклонению ионов на угол 0,1 мкрад.

ВЧ-квадруполь, работающий на частоте, соответствующей гармонике бетатронных колебаний, приводит к нагреву ионного пучка, в результате чего растет его поперечный размер и снижается плотность. Это в конечном итоге приводит к снижению инкремента неустойчивости и амплитуды когерентных вертикальных колебаний.

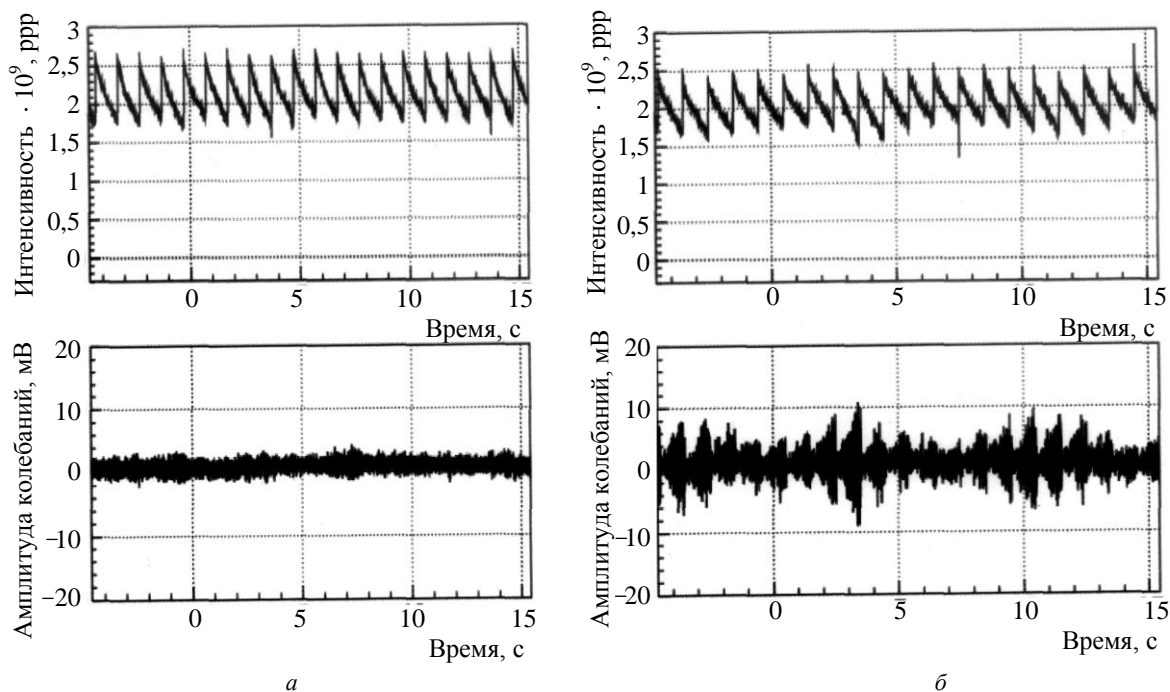


Рис. 10. Зависимость интенсивности ионов и амплитуды вертикальных когерентных колебаний от времени: а — резонансная частота $f = 825$ кГц; б — отстроенная частота ВЧ-квадруполя

Очистка вторичных ионов

Инкремент дипольной неустойчивости растет с концентрацией вторичных ионов в секции охлаждения [25]. Для ряда систем электронного охлаждения [22—24] диаметры вакуумной камеры в секции охлаждения и в секциях с электронной пушкой и коллектором отличаются, что приводит к возникновению ловушки для вторичных ионов, образующихся при ионизации атомов остаточного газа электронным пучком. Удаление вторичных ионов из секции охлаждения позволяет стабилизировать устойчивость первичных ионных пучков, циркулирующих в синхротроне. Для удаления вторичных ионов используется пикап с поперечным электрическим гармоническим полем [27]. Происходит резонансное удаление вторичных ионов, когда частота поперечного электрического поля пикапа совпадает с их некогерентной частотой поперечного движения.

В экспериментах на НИМАС напряжение на пикап-электродах составляет 10 В, а диапазон резонансных частот, когда происходит эффективное удаление вторичных ионов, лежит в интервалах 50—100 и 220—240 кГц [7, 23]. Зависимость амплитуды когерентных вертикальных колебаний накопленных ионов от времени показана на рис. 11. Очистка вторичных ионов включена после 4,5 с.

После экспериментов на НИМАС [7, 23] были проведены исследования вторичных ионов на накопителе COSY [24]. В них было показано значительное увеличение длительности импульса ус-

тойчивого протонного пучка при удалении вторичных ионов из системы электронного охлаждения.

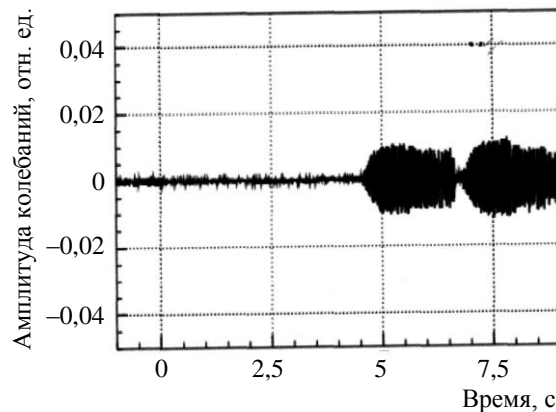


Рис. 11. Зависимость амплитуды вертикальных когерентных колебаний от времени (Очистка вторичных ионов выключена после 4,5 с)

Обратная связь

Системы с обратной связью эффективно используются в синхротронах для подавления поперечных когерентных колебаний ионов и значительного увеличения интенсивности накопленного пучка. Основными элементами систем обратной связи являются дифференциальный пикап, предназначенный для измерения поперечного смещения центра тяжести ионного пучка, и кикер, расположенный на расстоянии от пикапа, соответствующем

шем $\pi/2$ сдвигу фаз бетатронных колебаний между ними.

Использование системы обратной связи на накопителе LEAR с полосой пропускания 500 МГц позволило накопить в нем $8 \cdot 10^{10}$ антипротонов без развития поперечной неустойчивости [3]. Система обратной связи для подавления вертикальных когерентных колебаний на COSY с полосой пропускания 100 МГц [17] позволила в четыре раза увеличить количество накопленных протонов. В результате применения системы обратной связи было накоплено 10^{11} протонов при энергии инжекции 45 МэВ. Система обратной связи на НИМАС [26] позволила накопить $2,3 \cdot 10^9$ ионов Ar^{18+} при интервале между циклами инжекции в 3,3 с (рис. 12).

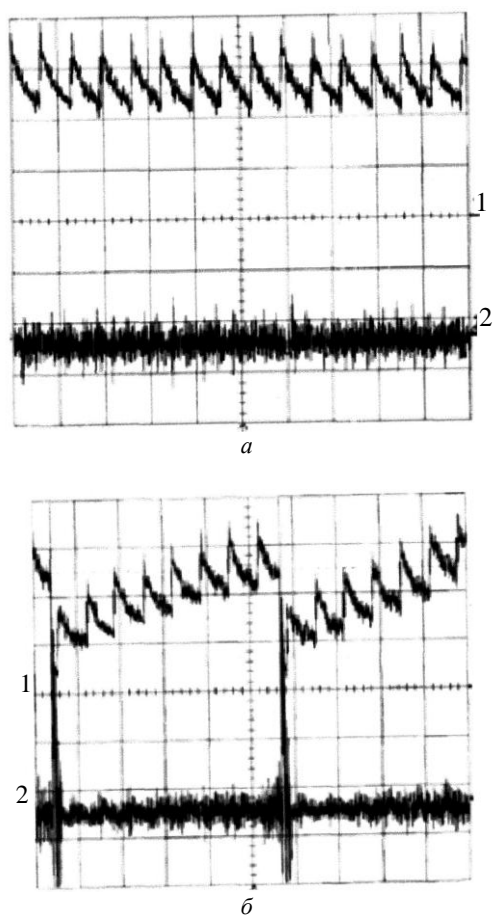


Рис. 12. Зависимость интенсивности накопленных ионов и амплитуды вертикальных когерентных колебаний от времени:
а — с обратной связью; б — без обратной связи

Система обратной связи S-LSR обеспечила подавление когерентных вертикальных бетатронных колебаний на накопителе, что увеличило интенсивность накопленного протонного пучка [28]. Однако ее применение одновременно привело к возбуждению когерентных горизонтальных бетатронных колебаний [28], что, по-видимому, обу-

словлено связью между вертикальными и горизонтальными колебаниями вследствие пространственного заряда электронного пучка и магнитного поля в соленоиде секции охлаждения.

Полый электронный пучок

Поскольку инкремент дипольной неустойчивости охлажденного ионного пучка пропорционален плотности электронного пучка, то снижение последней может приводить к стабилизации поперечных когерентных колебаний охлажденных ионов. Наряду с положительным эффектом снижение плотности электронного пучка приводит к увеличению времени охлаждения. В работе [29] предложено использовать трубчатый электронный пучок с малой плотностью электронов в его центральной части с поперечным размером в несколько миллиметров и с высокой плотностью на радиусах, больших 1—1,5 см. Такие пучки должны обеспечивать малое время охлаждения для вновь инжектируемых ионов с большой амплитудой бетатронных колебаний и устойчивость глубоко охлажденных ионов. В ближайшее время планируются эксперименты с использованием трубчатых электронных пучков, направленные на формирование высокоинтенсивных ионных пучков на накопителях в IMP [29], LEIR [30] и S-LSR [31].

Заключение

Формирование интенсивных пучков при инжекции ионов с использованием электронного охлаждения и накопления ограничено двумя эффектами: возникновением поперечных когерентных дипольных колебаний ионов и снижением их времени жизни.

Поперечные когерентные колебания ионов могут быть подавлены с применением систем обратной связи, при внешнем некогерентном нагреве ионов, удалении вторичных ионов, использовании трубчатых электронных пучков. Наличие некогерентного диффузионного нагрева ионов в результате шумов глубоко охлажденного ионного пучка приводит к снижению их времени жизни и определяет эффективность накопления ионов в синхротронах при энергии инжекции. Оптимальными для накопления ионов являются режимы, при которых удается избежать быстрых потерь ионов при возникновении неустойчивости, а применяемые методы ее подавления не приводят к заметному снижению времени жизни ионов.

Литература

1. Буджер Г. И., Скринский А. Н.// УФН. 1978. № 124. С. 561.
2. Мешков И. Н.// ЭЧАЯ. 1994. № 25. С. 1478.

3. Bosser J.// CAS CERN 92-01. 1992. № 147.
4. Franke B. et al.// J. Mod. Phys. A 2A. 1993. № 60.
5. Stein H. J., Meshkov I., Sidorin A. et al.// Атомная энергия 2003. № 1. — 24 с.
6. Syresin E., Noda K., Uesugi T., Shibuya S.// HIMAC-071, 2003.
7. Uesugi T., Noda K., Syresin E., Meshkov I., Shibuya S.// NIM A 545. 2005. № 45.
8. Shirai T., Fujimoto S., Noda A., Syresin E. et al.// ICFA HB2006 Workshop, KEK, 2006.
9. Noda K. et al.// APAC, Korea, 2004. № 552.
10. Fujisawa T. et al.// NIM A 506. 2003. № 50.
11. Noda K., Furukawa T., Shibuya S., E. Syresin et al.// EPAC-02, 2002.
12. Syresin E., Noda K., Uesugi T., Shibuya S.// EPAC-06, 2006.
13. Uesugi T., Fujisawa T., Noda K., Syresin E. et al.// PAC, USA, 2005.
14. Sidorin A., Meshkov I., Selesnev I., Smirnov A., Syresin E., Trubnikov G.// NIM A558, 2006. № 325.
15. Reistad D. et al.// CERN 94-03. 1994. № 18.
16. Steck M. et al.// NIM A 441. 2000. № 175.
17. Kamerdzhev V., Detrich J., Meshkov I., Sidorin A. et al.// NIM A532. 2004. № 285.
18. Parhomchuk V., Pestrikov D.// CERN 94-03. 1994. № 327.
19. Пархомчук В. В., Пева В. Б.// ЖЭТФ. 2000. № 91. С. 975.
20. Zenkevich P. R., Bolshakov A. E.// NIM A 441. 2000. № 36.
21. Burov A.// Ibid. 2000. № 23.
22. Syresin E., Noda K.// HIMAC-033, 2001.
23. Syresin E., Noda K., Uesugi T., Meshkov I., Shibuya S.// EPAC04, 2004
24. Korotaev Yu., Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A. et al.// COOL 05, 2005.
25. Zenkevich P., Dolinskii A., Hofmann I.// NIM A 532. 2004. № 454.
26. Noda K., Torikai K., Fujisawa T., Syresin E. et al.// ICFA HB2006 Workshop, KEK. 2006.
27. Bosser J., Meshkov I., Syresin E. et al.// NIM A 391, 1997. № 110.
28. Fujimoto S., Shirai T., Noda A. et al.// Japan journal of applied phys. 2006. № 45. L1307.
29. Bocharov A., Bublely A., Boimelstein Yu. et al.// NIM A532. 2004. № 144.
30. Tranquille G.// NIM A 532. 2004. № 399.
31. Syresin E., Noda K., Fadil H., Noda A., Shirai T.// HIMAC-064, 2003.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Formation and stability of high intensive cooled ion beam in synchrotron at injection energy

E. M. Syresin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

K. Noda

National Institute of Radiological Science, Chiba, Japan

The electron cooling stacking injection is one of most widely used injection method applied for formation of a high intensive cooled ion beams in the synchrotrons. The maximal available ion intensity in the synchrotron at the injection energy is defined by the ion life time and the cooling-stacking efficiency. The formation of the cooled high intensive beams is restricted by their instability leading to strong ion life time reduction. The results of experimental investigations and simulations of the cooling-stacking injection and stability of the high intensive cooled ion beams are discussed.

УДК 621.384.6

Импульсный инжектор позитронов низкой энергии

В. Ф. Быковский, А. Г. Кобец, Ю. В. Коротаев, И. Н. Мешков,
А. Ю. Рудаков, В. Н. Павлов, А. О. Сидорин, Г. В. Трубников, С. Л. Яковенко
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия.

Проведено тестирование криогенного источника позитронов с тестовым изотопом ^{22}Na , активностью 0,8 МБк. Получен пучок медленных позитронов интенсивностью $5,8 \cdot 10^3$ частиц в секунду со средней энергией 1,2 эВ при ширине спектра 1 эВ. Доля замедленных позитронов составила 1 % от полного потока. Проведено исследование процесса накопления частиц в ловушке на электронах. В результате оптимизации параметров ловушки достигнуто время жизни накопленных электронов $\tau_{life} \geq 80$ с, а эффективность захва-