

НЕКОГЕРЕНТНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ИОНОВ ПРИ МНОГООБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА С НАКОПЛЕНИЕМ И ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Е. М. Сыресин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Эффективность многооборотной инъекции ионов с использованием электронного охлаждения зависит от двух параметров: эффективности охлаждения и времени жизни ионов. Время жизни вновь инжектируемых ионов обычно меньше, чем время жизни глубоко охлажденных ионов, захваченных в стек. Вновь инжектируемые ионы теряются в вертикальном направлении, так как вертикальный акцептанс синхротрона обычно в несколько раз меньше горизонтального. Некогерентные вертикальные потери вновь инжектируемых ионов связаны с многократным рассеянием на атомах остаточного газа, а также с поперечной диффузией ионов, возникающей благодаря шуму стека. Снижение времени жизни ионов ограничивает эффективность многооборотной инъекции.

В работе представлены аналитические оценки и численные расчеты с использованием кода BETACOOOL вертикальных ионных потерь при многооборотной инъекции, а также дано сравнение с экспериментальными результатами, полученными в синхротроне НИМАС и накопительном кольце S-LSR.

The efficiency of the cooling stacking injection depends on two parameters: the cooling-accumulation efficiency and the ion lifetime. The lifetime of newly injected ions is usually smaller than the stack lifetime of high intensity ion beams. The incoherent losses of newly injected ions are related to multiple scattering on residual gas atoms and vertical heating caused by ion stack noise. The short lifetime of newly injected ions restricts the efficiency of the cooling stacking injection.

The experimental dates, analytical estimations and BETACOOOL simulations of vertical incoherent ion losses at cooling stacking injection are discussed.

PACS: 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Максимальная интенсивность накопленного ионного пучка (стека) при многооборотной инъекции с электронным охлаждением и накоплением ионов ограничена их временем жизни [1, 2]. Время жизни вновь инжектируемых ионов значительно меньше, чем время жизни накопленных ионов, и оно быстро снижается при росте интенсивности стека. Ниже рассматривается многооборотная инъекция с электронным охлаждением в присутствии шумов стека, приводящих к поперечной диффузии ионов. Показано, что

наличие диффузии ионов в вертикальном направлении вместе со слабым охлаждением вновь инжектируемых ионов с большими амплитудами бетатронных колебаний является основной причиной снижения времени жизни ионов и ограничения интенсивности накопленного пучка.

Потери ионов определяются аксептансом синхротрона, взаимодействием ионов с атомами остаточного газа и смещением равновесной орбиты стека во время инжекционного цикла. При инжекции равновесная орбита ионов стека смещена в горизонтальном направлении на некоторое расстояние относительно септума, и вновь инжектируемые ионы совершают бетатронные колебания относительно равновесной орбиты. Минимальный зазор между септумом и равновесной орбитой определяет аксептанс 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 электронного 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 накопительных ионов возвращается в начальное положение.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФУЗИЯ ИОНОВ

Схема многооборотной инжекции в горизонтальной плоскости на примере медицинского синхротрона НИМАС [1, 2] показана на рис. 1. Горизонтальный эмиттанс ε_{m0} в несколько раз больше, чем вертикальный аксептанс синхротрона ε_{y-ac} , $\varepsilon_{m0} \gg \varepsilon_{y-ac}$.

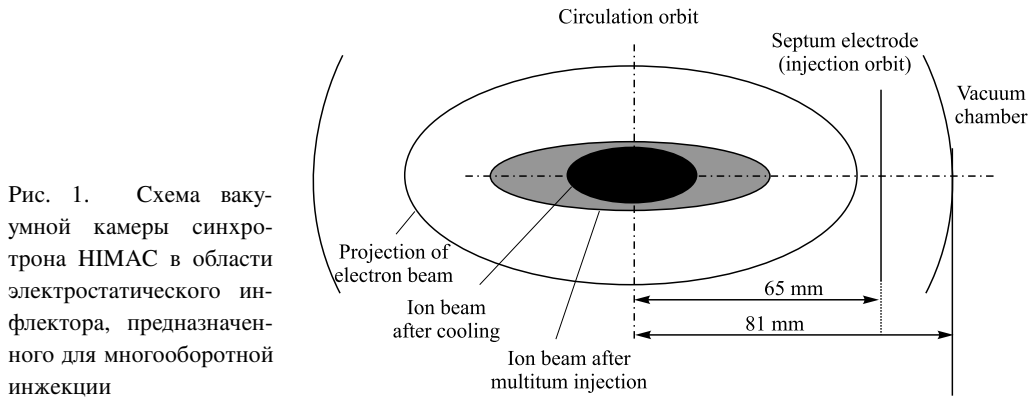


Рис. 1. Схема вакуумной камеры синхротрона НИМАС в области электростатического инфлектора, предназначенного для многооборотной инжекции

Равновесный эмиттанс стека ε_{st} в несколько раз меньше начального вертикального эмиттанса для вновь инжектируемых ионов ε_{y0} , $\varepsilon_{st} < \varepsilon_{y0}$. Для накопленного ионного пучка высокой интенсивности отношение его эмиттанса к числу накопленных частиц является константой, определяемой сдвигом бетатронной частоты ΔQ_{sp} ,

$$\frac{\varepsilon_{st}}{N_{st}} = \frac{(r_p/2\pi)(Z^2/A)}{\beta^2\gamma^3\Delta Q_{sp}}, \quad (1)$$

где r_p — радиус протона; Z и A — заряд и атомный номер иона; β и γ — релятивистские факторы. Плотность стека $n_{st} = N_{st}/\varepsilon_{st}$ в этом случае постоянна, и ее поведение обусловлено равновесием между электронным охлаждением и нагревом ионов за счет шумов стека и внутрипучкового рассеяния.

Когда шумы стека преобладают над внутрипучковым рассеянием равновесный эмиттанс стека определяется темпом охлаждения λ_{cool} и коэффициентом поперечной диффузии D , обусловленной этими шумами, $\varepsilon_{st} = D/\lambda_{cool}$. Подставив значение равновесного эмиттанса в формулу (1), получаем

$$\frac{D(N_{st})}{\lambda_{cool}N_{st}} = \frac{1}{n_{st}} = \frac{\varepsilon_{st-inj}}{N_{inj}},$$

где N_{inj} — интенсивность инжектируемого пучка; ε_{st-inj} — равновесный эмиттанс охлажденного пучка с интенсивностью N_{inj} .

Темп охлаждения вновь инжектируемых ионов зависит от текущего горизонтального эмиттанса ε_x инжектируемого пучка, $\lambda = \lambda_{cool}\varepsilon_1^{3/2}/(\varepsilon_1 + \varepsilon_x)^{3/2}$; здесь $\varepsilon_1 = \beta_x\theta_e^2$ — константа, определяемая эффективным угловым разбросом электронного пучка θ_e и горизонтальной β -функцией в системе электронного охлаждения. Обычно константа ε_1 удовлетворяет следующему условию $\varepsilon_{st} \ll \varepsilon_1 \ll \varepsilon_x$. В этом случае темп охлаждения вновь инжектируемых ионов равен $\lambda = \lambda_{cool}\varepsilon_1^{3/2}/\varepsilon_x^{3/2}$.

Вертикальный и горизонтальный эмиттансы для вновь инжектируемых ионов в присутствии охлаждения и поперечной диффузии определяются системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon_x}{dt} = -\lambda_{cool}\frac{\varepsilon_1^{3/2}}{\varepsilon_x^{3/2}}\varepsilon_x + D, \\ \frac{d\varepsilon_y}{dt} = -\lambda_{cool}\frac{\varepsilon_1^{3/2}}{\varepsilon_x^{3/2}}\varepsilon_y + D. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда диффузия уже играет заметную роль в поведении вертикального эмиттанса $D \approx \lambda_{cool}(\varepsilon_1/\varepsilon_x)^{3/2}\varepsilon_y$, но ее вкладом в горизонтальный эмиттанс при $\varepsilon_x \gg \varepsilon_y$ еще можно пренебречь. В результате, горизонтальный эмиттанс вновь инжектируемого пучка со временем уменьшается от ε_{x0} до ε_x в соответствии с уравнением

$$\varepsilon_x^{3/2}(t) = \varepsilon_{x0}^{3/2} - \frac{3}{2}\varepsilon_1^{3/2}\lambda_{cool}t. \quad (3)$$

При этом вертикальный эмиттанс ε_y для вновь инжектируемых ионов меняется во времени по закону

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_{y0}\frac{\varepsilon_x(t)}{\varepsilon_{x0}} + 2\varepsilon_x(t)\frac{D(\varepsilon_{x0}^{1/2} - \varepsilon_x(t)^{1/2})}{\lambda_{cool}\varepsilon_1^{3/2}}, \quad (4)$$

где ε_{y0} — начальный вертикальный эмиттанс. Поведение во времени вертикального эмиттанса в присутствии поперечной диффузии и электронного охлаждения показано

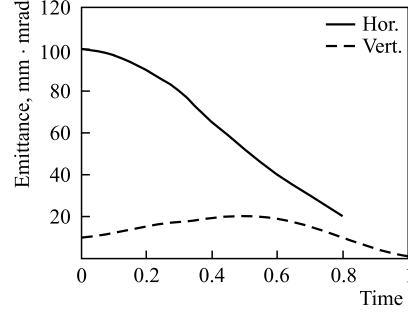


Рис. 2. Зависимость горизонтального и вертикального эмиттанса от времени для вновь инжектируемых ионов при охлаждении и поперечной диффузии

на рис. 2. Благодаря диффузии от шумов стека вертикальный эмиттанс вновь инжектируемых ионов сначала растет из-за слабости электронного охлаждения для ионов с большой горизонтальной бетатронной амплитудой. Он достигает максимума при $\varepsilon_{y0} \ll \varepsilon_{x0}$:

$$\varepsilon_{y\text{-max}}(N_{st}) = \frac{8}{27} \frac{D(N_{st})}{\lambda_{cool}} \left(\frac{\varepsilon_{x0}}{\varepsilon_1} \right)^{3/2}, \quad (5)$$

когда горизонтальный эмиттанс уменьшается под действием охлаждения до уровня $\varepsilon_{x\text{cool}} = 4\varepsilon_{x0}/9$. Дальнейшее охлаждение приводит к уменьшению вертикального эмиттанса благодаря снижению горизонтальной амплитуды бетатронных колебаний.

НЕКОГЕРЕНТНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ИОНОВ

Ионы, инжектируемые с большими бетатронными амплитудами в горизонтальном направлении, теряются в вертикальном направлении, когда их эмиттанс $\varepsilon_{y\text{-max}}$ достигает вертикального аксептанса, $\varepsilon_{y\text{-max}} = \varepsilon_{y\text{-ac}}$. Данное условие определяет горизонтальный эмиттанс $\varepsilon_{x0\text{-los}}(N_{st})$, при котором ионы будут потеряны в вертикальном направлении:

$$\varepsilon_{x0\text{-los}}(N_{st}) = \frac{9}{4} \varepsilon_1 \left(\frac{\varepsilon_{y\text{-ac}}}{D(N_{st})/\lambda_{cool}} \right)^{2/3} = \frac{9}{4} \varepsilon_1 \left(\frac{\varepsilon_{y\text{-ac}}}{\varepsilon_{st\text{-inj}}} \right)^{2/3} \left(\frac{N_{inj}}{N_{st}} \right)^{2/3}.$$

Количество ионов, теряемых в вертикальном направлении, определяется следующим соотношением:

$$N_{inj\text{-los}} = N_{inj} \frac{\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{x0\text{-los}}}{\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{st\text{-ac}}}. \quad (6)$$

Время жизни инжектируемых ионов равно

$$\tau_{inj} = T_{inj} \frac{N_{inj}}{N_{inj\text{-los}}} = T_{inj} \frac{\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{st\text{-ac}}}{\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{x0\text{-los}}}. \quad (7)$$

Зависимость времени жизни инжектируемых протонов для накопителя SLSR, приведенная на рис. 3, находится в согласии с полученными экспериментальными результатами.

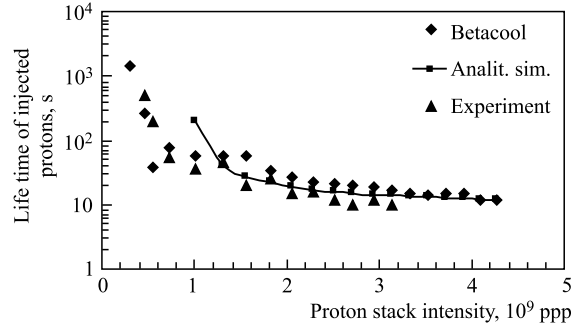


Рис. 3. Зависимость времени жизни вновь инжектируемых протонов от интенсивности стека при инжекционной интенсивности $4 \cdot 10^8$ протонов за импульс, $T_{inj} = 10$ с, $I = 100$ мА и $R = 2$

Расчеты времени жизни протонов приведены для следующих параметров SLSR: $\varepsilon_{m0} = 80\pi$ мм·мрад, $\varepsilon_{st-ac} = 20\pi$ мм·мрад, $\varepsilon_{y-ac} = 30\pi$ мм·мрад, $\varepsilon_1 = 3\pi$ мм·мрад и $\varepsilon_{st-inj} = 0,3\pi$ мм·мрад. Количество ионов, захваченных в стек, при одном цикле инжекции равно

$$N_{inj-cap} = N_{inj} - N_{inj-loss} = N_{inj} \frac{\varepsilon_{x0-loss} - \varepsilon_{st-ac}}{\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{st-ac}}. \quad (8)$$

Количество инжектируемых ионов, захваченных в стек, стремится к нулю, когда $\varepsilon_{x0-loss} = \varepsilon_{st-ac}$, что соответствует максимальной интенсивности стека

$$N_{st-max} = N_{inj} \left(\frac{9\varepsilon_1}{4\varepsilon_{st-ac}} \right)^{2/3} \frac{\varepsilon_{y-ac}}{\varepsilon_{st-inj}}. \quad (9)$$

В этом случае все вновь инжектируемые ионы теряются в вертикальном направлении благодаря шумам стека за цикл инжекции, так что их время жизни равно $\tau_{inj} = T_{inj}$. Время жизни стека в этом режиме на несколько порядков превышает время жизни инжектируемых ионов. Такой режим многооборотной инжекции реализуется в накопителе S-LSR (рис. 3).

Для синхротрона НИМАС реализуется режим многооборотной инжекции в присутствии вертикальных потерь с меньшей разницей времени жизни ионов стека и вновь инжектируемых ионов. Время жизни ионов в стеке τ_{st} для этого синхротрона только в два раза больше, чем время жизни инжектируемых ионов τ_{inj} . За один цикл инжекции количество ионов, теряемых стеком, равно

$$N_{st-loss} = \frac{T_{inj}}{\tau_{st}} N_{inj}. \quad (10)$$

При равновесной интенсивности стека количество ионов, захваченных в стек за цикл инжекции $N_{inj-cap}$, соответствует количеству ионов, теряемых стеком за это время, $N_{inj-cap} = N_{st-loss}$. При условии, когда $\varepsilon_{m0} \gg \varepsilon_{st-ac}$ и $\varepsilon_{x0-loss} \gg \varepsilon_{st-ac}$, равновесная интенсивность стека равна

$$N_{st-eq} = N_{inj} \left(\frac{9}{4} \frac{\tau_{st}}{T_{inj}} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{m0}} \right)^{3/5} \left(\frac{\varepsilon_{y-ac}}{\varepsilon_{st-inj}} \right)^{2/5}. \quad (11)$$

Равновесная интенсивность стека пропорциональна вертикальной апертуре a_{y-ac} , $N_{st-eq} \propto a_{y-ac}^{4/5}$, что находится в согласии с экспериментальными результатами, полученными в синхротроне НИМАС. Для данного режима характерна нелинейная зависимость равновесной интенсивности стека от времени жизни ионов в нем $N_{st} \propto N_{inj}(\tau_{st}/T_{inj})^{3/5}$.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ МНОГООБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Численные расчеты многооборотной инжекции выполнены с использованием кода ВЕТАСОOL [3], в котором учтены следующие эффекты нагрева ионов: внутривпучковое рассеяние, взаимодействие ионов с атомами остаточного газа и поперечная диффузия ионов. Потери ионов определяются акцептансом синхротрона, взаимодействием ионов с атомами остаточного газа и смещением равновесной орбиты стека во время инжекционного цикла.

Многочисленное рассеяние ионов на атомах остаточного газа и их поперечная диффузия за счет шумов стека являются основными источниками потерь вновь инжектируемых ионов для синхротрона с относительно малым вертикальным акцептансом и слабым охлаждением при больших амплитудах горизонтальных бетатронных колебаний во время многооборотной инжекции.

Расчетная зависимость интенсивности накопленных ионов в синхротроне НИМАС от времени показана на рис. 4, здесь I — ток электронного пучка, R — отношение магнитного поля в пушке к полю в области охлаждения. Время жизни ионов стека в расчетах составляет 8 с, а время жизни вновь инжектируемых ионов равно 4 с.

Особенностью многооборотной инжекции в накопителе S-LSR является большая разница во времени жизни для ионов стека и инжектируемых ионов [4]. Расчетная величина времени жизни протонов в стеке равна 1500 с, в то время как для инжектируемых ионов она составляет всего лишь 10 с при высокой интенсивности стека. Снижение времени жизни вновь инжектируемых ионов (рис. 3) обусловлено темпом вертикального нагрева ионов, равным $\dot{\epsilon}_V = 5 \cdot 10^{-3}(N_{st}/N_{inj})\pi$ мм·мрад/с. Численные расчеты приведены для следующих параметров накопителя S-LSR в горизонтальном и

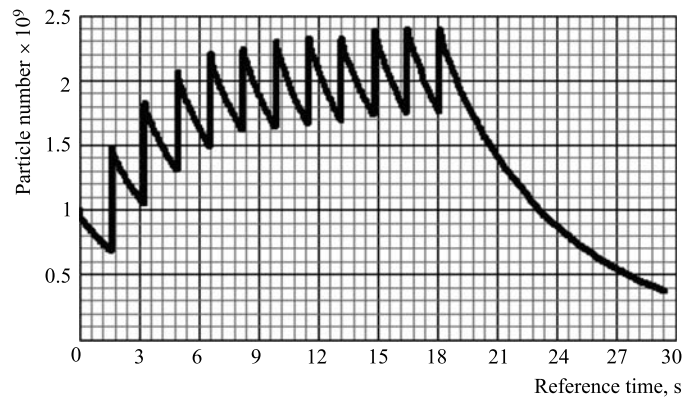


Рис. 4. Зависимость расчетной интенсивности стека в синхротроне НИМАС от времени для $I = 100$ мА и $R = 2$

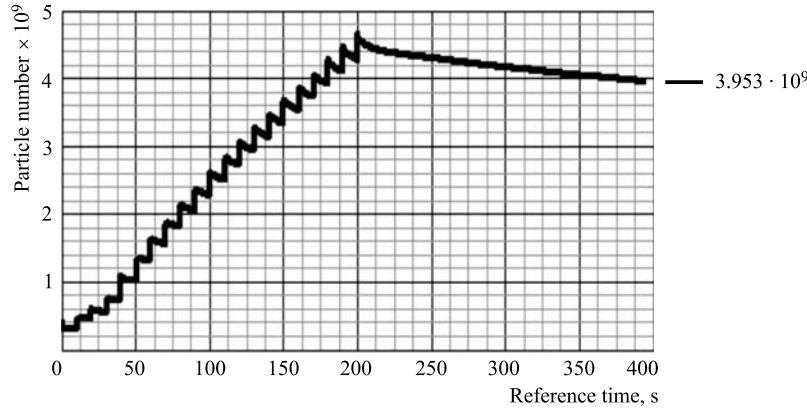


Рис. 5. Зависимость расчетной интенсивности стека в накопительном кольце S-LSR от времени для $I = 100$ мА и $R = 2$

вертикальном направлении соответственно: акцептанс кольца $\varepsilon_{ac} = 2500/30\pi$ мм·мрад, $\varepsilon_{st-ac} = 20/30\pi$ мм·мрад, $\varepsilon_{inj} = 80/10\pi$ мм·мрад. Электронное охлаждение протонов рассчитано на основе модели Пархомчука при эффективной температуре электронов 10 мэВ. Результаты расчетов рис. 5 находятся в хорошем согласии с данными экспериментов на S-LSR при использовании системы обратной связи для подавления неустойчивости [5, 6]. Величина максимальной интенсивности стека обусловлена вертикальными потерями вновь инжектируемых ионов из-за шумов стека, приводящих к поперечной диффузии протонов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГООБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Экспериментальные исследования многооборотной инжекции приведены для синхротрона НИМАС [1–2, 7–10] и накопительного кольца S-LSR [4–6].

Максимальная интенсивность накопленных ионов Ag^{18+} при многооборотной инжекции с электронным охлаждением в НИМАС составила $2,5 \cdot 10^9$ частиц за импульс. Типичное значение коэффициента накопления равно 3–5 для интенсивности стека $(1,5–2,5) \cdot 10^9$ частиц за импульс при инжекционной интенсивности $(0,3–1) \cdot 10^9$ частиц за импульс. Равновесный эмиттанс стека пропорционален $\varepsilon_{st} \propto N_{st}^{2/3}$ [1, 2] (рис. 6) при его низкой интенсивности менее 10^8 частиц за импульс. При интенсивности, равной большому числу частиц за импульс, эмиттанс стека пропорционален числу частиц $\varepsilon_{st} \propto N_{st}$ в соответствии с моделью, приведенной в аналитических расчетах. При росте эмиттанса с числом частиц плотность стека остается постоянной и равной $9 \cdot 10^6$ ионов/мм² [1, 2]. Интенсивность стека линейно уменьшается при снижении вертикальной апертуры в диапазоне 5–15 мм (рис. 7). Ионная интенсивность становится равной нулю при апертуре $a_{y-ac} \sim 5$ мм, что обусловлено возмущениями замкнутой орбиты. При большей апертуре линейный рост интенсивности стека в эксперименте хорошо согласуется с расчетной зависимостью его интенсивности от апертуры $N_{st} \propto a_{y-ac}^{4/5}$.

Многооборотная инжекция с электронным охлаждением на НИМАС имеет две особенности: время жизни вновь инжектируемых ионов в два раза меньше, чем время жизни

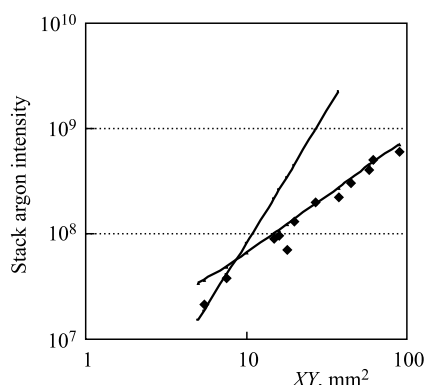


Рис. 6. Зависимость интенсивности стека от его поперечных размеров

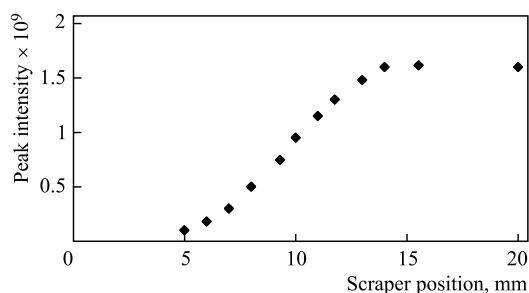


Рис. 7. Зависимость интенсивности стека при изменении вертикальной апертуры НИМАС

накопленных ионов (рис. 8), размер стека в два раза больше, чем это следует из внутрипучкового рассеяния.

Время жизни ионов стека составляет 6–8 с при его интенсивности $(1,5–2,5) \cdot 10^9$ ионов за импульс, время жизни вновь инжектируемых ионов равно 3–4 с. Снижение времени жизни вновь инжектируемых ионов обусловлено их вертикальными потерями благодаря поперечной диффузии при слабом электронном охлаждении для ионов с большими горизонтальными амплитудами бетатронных колебаний

Многооборотная инжекция с электронным охлаждением реализована на S-LSR для формирования интенсивных протонных пучков. Максимальная интенсивность накопленных протонов составила 500 мкА ($2 \cdot 10^9$ протонов) при инжекционном токе 100 мкА [4]. Время жизни протонов стека составляет 1500 с и на два порядка больше, чем время жизни инжектируемых протонов. Время жизни инжектируемых протонов ограничено, прежде всего, шумами стека, приводящими к вертикальной диффузии протонов и их потерям на апертуре синхротрона. Еще одним ограничением на максимальную интенсивность стека в S-LSR является его когерентная неустойчивость. Применение системы обратной связи [5, 6] позволяет подавить вертикальные когерентные колебания и увеличить интенсивность стека до 1,2 мА ($4,5 \cdot 10^9$ протонов). Интенсивность протонов стека в S-LSR нелинейно зависит от времени их жизни (рис. 3).

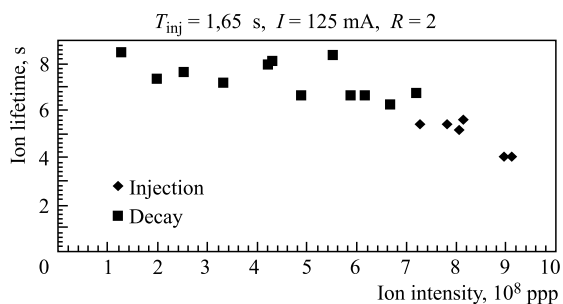


Рис. 8. Зависимость времени жизни ионов от интенсивности стека в синхротроне НИМАС для $I = 125$ мА и $R = 2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование интенсивных пучков при многооборотной инжекции ионов с использованием электронного охлаждения и накопления ограничено вертикальными потерями ионов, возникающими из-за шумов стека.

Благодаря диффузии ионов в вертикальном направлении время жизни вновь инжектируемых ионов для синхротрона HIMAC в два раза меньше, чем для ионов стека. В накопительном кольце S-LSR время жизни инжектируемых протонов на два порядка меньше, чем время жизни частиц стека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uesugi T. et al.* Cool-Stacking Injection and Damping of a Transverse Ion-Beam Instability at the HIMAC Synchrotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 545. P. 43–56.
2. *Сыресин Е. М., Нода К.* Формирование и устойчивость охлажденных интенсивных пучков в синхротроне при энергии инжекции // Прикл. физика. 2008. № 2. С. 14–24.
3. *Sidorin A. et al.* BETACOOOL Program for Simulation of Beam Dynamic in Storage Rings // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558. P. 325–328.
4. *Shirai T. et al.* Commissioning of Electron Beam Cooling at S-LSR // ICFA HB2006 Workshop. KEK. 2006. P. 247–249.
5. *Fujimoto S. et al.* Feedback Damping of a Coherent Instability at Small-Laser Equipped Storage Ring S-LSR // Jap. J. Appl. Phys. 2006. V. 45, No. 49. P. 1307–1310.
6. *Syresin E.* Comments to S-LSR Staking Experiments with Feedback System // Beam Sci. Technol. 2008. V. 11. P. 3–6.
7. *Uesugi T. et al.* Dynamic of a High Density Ion-Beam with Electron Cooling in the HIMAC Synchrotron // Proc. of Part. Accel. Conf. «PAC 05». Tennessee, 2005. P. 416–418.
8. *Syresin E. et al.* Numerical and Experimental Study of Cooling-Stacking Injection in HIMAC Synchrotron // Proc. Eur. Part. Accel. Conf. «EPAC 06». 2006. P. 2907–2909.
9. *Syresin E., Noda K.* Cooling-Stacking Experiments with Argon Beam at HIMAC Synchrotron. Preprint HIMAC-097. 2004. 15 p.
10. *Syresin E.* Simulation of Incoherent Vertical Losses and Cooling-Stacking Injection // Proc. of Eur. Part. Accel. Conf. «EPAC 08». 2008. P. 3494–3496.

Получено 31 января 2014 г.