

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ИЯИ РАН ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

В.А. Моисеев

Институт ядерных исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

E-mail: moiseev@inr.ru

Накопитель протонов ИЯИ РАН был разработан для преобразования 600 МэВ пучка линейного ускорителя для экспериментальных задач. Современное состояние ускорителя ИЯИ РАН позволяет производить пучок частиц с существенно меньшей, чем проектная, энергией (< 210 МэВ). Приведены результаты исследования работы накопителя и динамики пучка в нем для низких значений энергии инжекции.

1. НАКОПИТЕЛЬ ПРОТОНОВ

Накопитель протонов ИЯИ РАН разрабатывался для преобразования временной структуры импульса тока ускоренного пучка ионов H^- линейного ускорителя (ЛУ) в соответствии с условием проведения ряда физических экспериментов. Основные параметры пучка ЛУ при номинальном режиме работы приведены в Табл.1.

Таблица 1. Основные параметры пучка

Тип частиц	H^-
Энергия частиц, W_0 , МэВ	600
Релятивистский фактор, γ	1,6395
Средний импульсный ток, I_b , мА	50
Длительность импульса пучка, T_p , мкс	100
Частота следования макроимпульсов пучка, Гц	100
Частота следования микросгустков, f_{sf} , МГц	198,21
Длительность микросгустков, T_b , нс	~0,2
Относительный импульсный разброс (на уровне 99%) в пучке, $\Delta p/p_0$	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$
Ненормализованный поперечный эмиттанс (на уровне 98%), ϵ_b , п-м-м-мрад	3
Количество частиц в макроимпульсе пучка	$3,12 \cdot 10^{13}$

В настоящее время для работы действующих установок нейтронного комплекса ИЯИ РАН необходим один из основных спроектированных режимов накопителя протонов: компрессия макроимпульса тока пучка ЛУ до нескольких сотен наносекунд [1].

В накопителе отсутствуют ВЧ-элементы. Для сохранения сгустковой структуры циркулирующего в накопителе пучка, предполагается работа в изохронном режиме, т.е. критическая энергия магнитной структуры накопителя γ_{tr} близка к релятивистскому фактору γ инжектируемого пучка. Основные элементы структуры накопителя – дипольные магниты и квадрупольные линзы.

В Табл.2 приведены параметры накопителя для номинального режима компрессии пучка ЛУ.

В данном режиме макроструктура импульса тока ЛУ прерывается специальным устройством – чоппером, который устанавливается на канале инжекции в ЛУ. Это дает возможность получить в накопительном кольце сгусток длительностью (100...350) нс. Интервал длительностью ≥ 100 нс, свободный от частиц в циркулирующем в накопителе пучке, используется для включения киккер-магнита. После окончания инжекции в накопитель (~100 мкс) производится вывод накопленных частиц за один оборот циркуляции пучка (~450 нс).

Таблица 2. Параметры накопителя

Периметр, L , м	106,7
Период обращения, T_{rev} , нс	449,13
Число накопленных частиц, N_{tot}	$2,43 \cdot 10^{13}$
Поперечные эмиттансы (ненормализованные), $\epsilon_x = \epsilon_y$, п-мм-мрад	30
Максимальный накопленный ток, I_{st} , А	11,15
Частоты бетатронных колебаний, Q_x	2,165
Q_y	2,220
Критическая энергия накопителя, γ_{tr}	1,6401

По техническим причинам в настоящее время энергия пучка ЛУ не превышает 209 МэВ.

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЭНЕРГИИ ИНЖЕКЦИИ

Учитывая то, что силу квадрупольных линз $k = eG/p_0$ (где G – градиент магнитного поля в линзе, а p_0 – центральный импульс инжектируемого пучка) и радиус поворота дипольных магнитов $\rho = p_0/eB$ (где B – магнитное поле на оси диполя) можно сохранить постоянными [2], в первом порядке по относительному отклонению импульса $\delta = \Delta p/p_0$ матрица Твисса накопителя, все характеристические функции (β -функции, дисперсионные функции Ψ , набег фаз поперечных колебаний μ), критическая энергия γ_{tr} [2] остаются неизменными при любой энергии инжекции. В каждом конкретном случае возможно изменение силы квадрупольных линз с целью получения лучших характеристик накопленного пучка.

При снижении энергии пучка ЛУ теряется условие изохронности ($\gamma \approx \gamma_{tr}$) работы накопителя, увеличивается импульсный разброс частиц в инжектируемом пучке, усиливается действие пространственного заряда накопленного пучка, возможно возникновение неустойчивостей динамики циркулирующего в накопителе сгустка. Что, в свою очередь, приводит к уменьшению числа накопленных частиц и снижает эффективность работы накопителя.

2.1. НАРУШЕНИЕ ИЗОХРОННОСТИ

Без учета взаимодействия частиц с коллективным полем циркулирующего сгустка, а также, принимая во внимание отсутствие в накопителе ВЧ-резонаторов, частица с относительным отклонением импульса δ за период обращения пройдет расстояние, отличающееся от периметра установки на величину [3]

$$\Delta l = L \cdot \delta \cdot \eta, \quad \text{где} \quad \eta = \frac{p}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dp} \approx \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_{tr}^2}. \quad (1)$$

Принимая во внимание то, что при ускорении в ЛУ относительный импульсный разброс частиц в микросгустках пучка изменяется с ростом энергии по закону [4] $\delta(W) \sim \beta^{-5/4} \gamma^{-1/4}$, справедлив закон масштабирования

$$\delta(W) = \delta(600) \cdot \frac{(\beta^{5/4} \gamma^{1/4})_{600}}{(\beta^{5/4} \gamma^{1/4})_W}, \quad (2)$$

где число 600 означает, что данные параметры относятся к номинальному режиму работы накопителя (Таблицы 1-2), а знак W – к значению параметров при исследуемой энергии ЛУ.

Период обращения пучка со средней энергией W $T_{rev}(W) = L / \beta_{Wc}$. Число оборотов накопленного сгустка за макроимпульс ЛУ $N_{rev}(W) = T_p / T_{rev}(W)$. Следовательно, время инжекции пучка на каждом обороте циркуляции в накопителе, т.е. длительность импульса чоппера на канале инжекции в ЛУ:

$$T_{ch}(W) \approx T_{rev}(W) - \frac{2 \cdot \Delta l \cdot N_{rev}(W)}{\beta_{Wc}} - t_k, \quad (3)$$

где $t_k \approx 100$ нс – время, необходимое для включения киккер-магнита для вывода пучка из накопителя. Отметим, частота срабатывания чоппера определяется $f_{ch} = 1 / T_{rev}(W)$. Средний ток в циркулирующем сгустке к концу процесса инжекции

$$\bar{I}_c \approx I_b \cdot N_{rev}(W) \cdot \frac{T_{ch}(W)}{T_{rev}(W) - t_k} = I_{max} \cdot \frac{T_{ch}(W)}{T_{rev}(W) - t_k}. \quad (4)$$

Данная зависимость представлена на Рис.1. Очевидно значительное сокращение возможного числа накопленных частиц при нарушении изохронности.

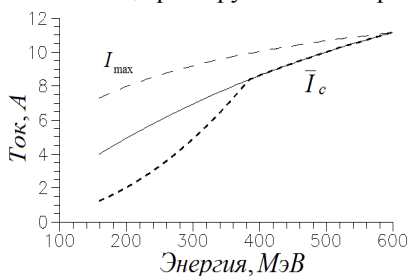


Рис.1. Максимальный и средний накопленные токи

За время дрейфа пучка ЛУ происходит увеличение продольных размеров каждого микросгустка. Согласно [4] при ускорении размер микросгустка пучка изменяется по закону $\Delta z(W) \sim \gamma^{-3/4} \beta^{1/4}$, откуда получаем закон масштабирования

$$\Delta z(W) = \Delta z(600) \cdot \frac{(\gamma^{-3/4} \beta^{1/4})_W}{(\gamma^{-3/4} \beta^{1/4})_{600}},$$

где $\Delta z(600) \approx T_b \beta c$ – для номинального режима работы ЛУ. Для меньших значений энергии пучка ЛУ микросгустки пролетают в дрейфе оставшуюся часть ускорителя и расстояние между ускорителем и точкой инжекции в накопитель (~ 100 м). На Рис.2 представлены расчетные зависимости размера микросгустка ЛУ $\Delta z_{inj}(W)$ и расстояния между двумя соседними микросгустками $\Delta z_{rf}(W) = \beta_W \cdot c / f_{rf}$ в точке инжекции в накопитель.

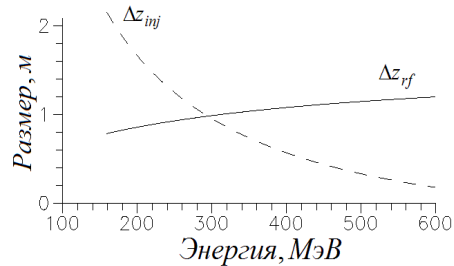


Рис.2. Характерные размеры в точке инжекции

При энергии $W \approx 310$ МэВ микроструктура пучка ЛУ в точке инжекции в накопитель начинает исчезать, а при энергии $W \approx 200$ МэВ практически перестает существовать. Удлинение микросгустков от энергии инжекции необходимо учесть в (3), уменьшая длительность импульса чоппера на $\Delta T_{ch}(W) = \Delta z_{inj}(W) / \beta_{Wc}$ (~ 14 нс при $W \approx 160$ МэВ).

Дополнительно к процессу “расплывания” микросгустков из-за нарушения изохронности магнитной структуры накопителя для данной энергии пучка ЛУ рекомендуется процедура сглаживания продольной плотности циркулирующего сгустка: накопитель настраивается на такую энергию W_L , чтобы выполнялось условие $T_{rev}(W_L) = n / f_{rf} \pm \Delta \tau$, где $n = \text{int}[T_{rev}(W_L) \cdot f_{rf}]$ – число микросгустков пучка ЛУ, инжектируемых за период обращения частиц в накопителе. Величина $\Delta \tau \ll 1 / f_{rf}$ подбирается расчетным образом для каждой энергии пучка ЛУ.

В поперечной плоскости без учета взаимодействия частиц с коллективным полем накопленного сгустка изменение энергии инжектируемого пучка слабо влияет на характеристики циркулирующего сгустка. Размер пучка в каждой из поперечных плоскостей в любой точке s накопителя можно рассчитать по формуле

$$r(s) = \sqrt{\beta(s) \cdot \varepsilon + \psi(s) \cdot \delta(W)},$$

где ε – ненормализованный эмиттанс накопленного пучка в данной плоскости, $\beta(s)$ и $\psi(s)$ – характеристические функции накопителя в данной плоскости. Ранее было отмечено, что характеристические функции структуры накопителя можно сохранить постоянными для любой энергии инжекции. Ненормализованный эмиттанс (Табл.2) также можно считать

постоянным. Тогда изменение размера циркулирующего сгустка происходит только из-за изменения относительного импульсного разброса $\delta(W)$ в пучке ЛУ в зависимости от энергии (2). Отметим, что данное изменение размера происходит на участках с ненулевой дисперсией и, главным образом, в горизонтальной плоскости, поскольку $\psi_x(s) \gg \psi_y(s)$. В зависимости от энергии ЛУ ненормализованный эмиттанс инжектируемого пучка можно оценить по формуле [4] $\varepsilon_b(W) = \varepsilon_b(600) \cdot (\beta\gamma)_{600} / (\beta\gamma)_W$. В Табл.3 представлен ряд параметров из данного раздела в исследуемом диапазоне энергий.

Таблица 3. Параметры пучка

Энергия, МэВ	160	600
T_{rev} , нс	684	449
T_{ch} , нс	320	349
I_{max} , А	7.30	11.15
\bar{I}_c , А	4.02	11.15
δ , %	0.37	0.2
$\varepsilon_{b,\pi}$ · мм·мрад	6.4	3.0
x_{max} , мм	64	42

Из данных Табл.3 следует:

- время срабатывания чоппера изменяется незначительно;
- существенно изменяется число накопленных частиц (средний ток в циркулирующем сгустке);
- эмиттанс инжектируемого пучка много меньше предполагаемого эмиттанса накопленного пучка (см.Табл.2), что позволяет реализовывать спиральную инжекцию [5] для более равномерного заполнения поперечного фазового объема циркулирующего сгустка при любой энергии пучка ЛУ;
- размеры циркулирующего пучка на дисперсионных участках накопителя много меньше радиуса камеры установки (~100 мм).

2.2. ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Учитывая особенности формирования накопленного пучка:

- поперечные размеры циркулирующего сгустка много меньше его продольных размеров;
- длины изменения поперечных характеристик накопителя много больше размеров циркулирующего пучка;
- при оптимальном режиме инжекции продольная микроструктура пучка ЛУ полностью исчезает в циркулирующем сгустке;

можно рассматривать влияние пространственного заряда на поперечную и продольную динамику частиц раздельно. Возможно выполнение всех приведенных условий при любой энергии пучка ЛУ.

Пространственный заряд приводит к изменению всех структурных функций накопителя. Так, например, в “гладком” приближении бетатронная частота поперечных вертикальных колебаний изменяется на величину [6]

$$\Delta Q_y(W) = - \frac{2r_0 I_{max}(W) \cdot R}{ec(\beta^3 \gamma^3)_W \cdot \varepsilon_y} \cdot \left\langle \frac{b}{a+b} \right\rangle_W,$$

где r_0 – классический радиус протона, $R = L/2\pi$ – средний радиус накопителя, $\langle \dots \rangle$ – усреднение по периметру накопителя.

Полагая, что в зависимости от энергии инжекции размеры циркулирующего сгустка к окончанию процесса накопления всегда примерно одинаковые, получаем следующий закон изменения частоты поперечных некогерентных бетатронных колебаний:

$$k_Q = \frac{\Delta Q_W}{\Delta Q_{600}} = \frac{N_{rev}(W)}{N_{rev}(600)} \cdot \frac{(\beta^3 \gamma^3)_{600}}{(\beta^3 \gamma^3)_W}.$$

Данная зависимость приведена на Рис.3.

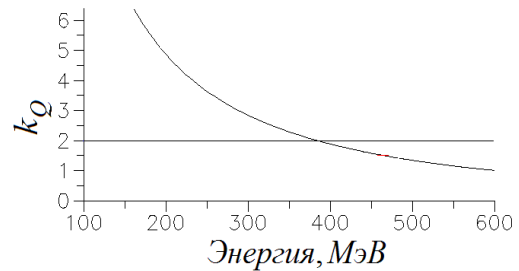


Рис.3. Зависимость коэффициента сдвига частоты бетатронных колебаний

Расчеты [7] показали, что для номинального режима работы накопителя $\Delta Q_x = 0.04$, $\Delta Q_y = 0.07$. Горизонтальный некогерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний меньше вертикального из-за большего размера пучка в данной плоскости вследствие существенного значения дисперсионной функции. Если ограничить величину $\Delta Q \leq 0.15$, тогда инжекция пучка ЛУ возможна при снижении энергии до ~380 МэВ. Дальнейшее понижение энергии инжекции возможно либо уменьшением среднего инжектируемого тока, либо специальной перестройкой структурных функций накопителя. Для первого решения на Рис.1 приведено уменьшение среднего накопленного тока (мелкий пунктир), который можно накопить с учетом пространственного заряда циркулирующего пучка.

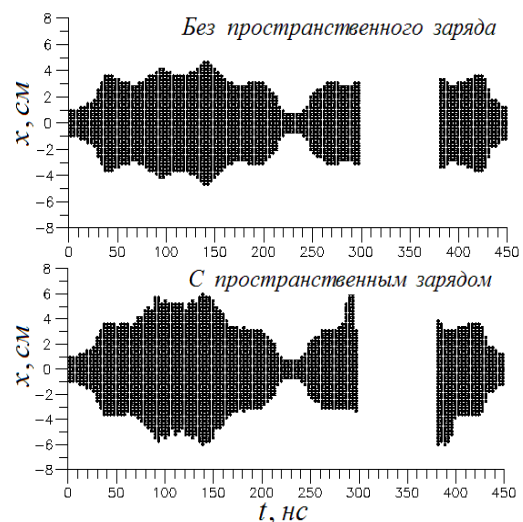


Рис.4. Проекция пучка в горизонтальной плоскости

Следует отметить, в вертикальной плоскости возможно увеличение эмиттанса циркулирующего сгустка в $\sim (3 \dots 4)$ раза, что ведет к допустимому увеличению размера пучка в этой плоскости, т.е. к существенному сокращению некогерентного сдвига частоты бетатронных колебаний в данной плоскости.

В продольной плоскости при циркуляции силовоточного пучка с энергией ниже критической энергии установки взаимодействие пучка с окружающим оборудованием определяется пространственным зарядом [8]. Учитывая особенности формирования циркулирующего пучка в накопителе, продольное электрическое поле пространственного заряда возникает на концах накопленного сгустка из-за градиента продольной плотности заряда, изменяя импульсы частиц на концах циркулирующего сгустка и приводя к изменению радиального (из-за наличия дисперсии) и продольного положения частиц при движении в накопителе. Причем в “голове” сгустка происходит увеличение импульса частиц, а в “хвосте” – уменьшение. В результате циркулирующий сгусток удлиняется и искажается на концах Рис.4.

При $\eta \rightarrow 0^+$ (1) (изохронный режим) циркулирующий сгусток практически не удлиняется, т.е. продольная плотность заряда остается постоянной, сохраняются большие градиенты плотности заряда на концах сгустка. Это, в свою очередь, ведет к существенному изменению относительного импульсного разброса для краевых частиц и, как следствие, к пространственному искажению формы сгустка на краях. Данный процесс был исследован для номинального режима работы накопителя [9] (см. Рис.4). Было показано, что существенные изменения импульса из-за действия пространственного заряда происходят в краевых областях ~ 20 нс (по временной шкале). При спаде продольной плотности заряда на краях сгустка за время более 7.5 нс (по временной шкале) потери частиц в накопителе отсутствуют. Данное условие практически может быть реализовано незначительным отклонением частоты чоппера от частоты обращения частиц в накопителе.

При уменьшении энергии инжекции частиц в накопитель из-за нарушения изохронности движения на каждом обороте циркуляции накопленного сгустка происходит его удлинение на краях (1), что, естественно, ведет к снижению градиентов продольной плотности заряда на концах накопленного сгустка. На Рис.5 приведены оценочные зависимости дополнительного изменения относительного импульсного разброса $\Delta\delta$ и дополнительного продольного удлинения $\Delta(\Delta l)$ для частиц на краях циркулирующего сгустка при низких значениях энергии инжекции в накопитель. Более точные данные для каждой конкретной энергии пучка ЛУ необходимо получить детальным моделированием, результаты которого необходимо учесть при вычислении времени срабатывания чоппера (3). Действие пространственного заряда пучка в продольном направлении ведет к снижению времени срабатывания чоппера и к уменьшению среднего тока (4) в накопленном сгустке.

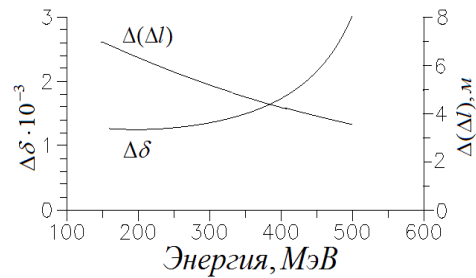


Рис.5. Изменения на краях накопленного сгустка

2.3. НЕУСТОЙЧИВОСТИ НАКОПЛЕННОГО ПУЧКА

Принимая во внимание длину циркулирующего накопленного сгустка $\sim (92 \dots 83)$ м в исследуемом диапазоне энергий ЛУ (160...600) МэВ и отсутствие в накопленном сгустке микроструктуры пучка ЛУ, основными типами неустойчивости движения сгустка будут продольная и поперечная микроволновая неустойчивости, а также электрон-протонная неустойчивость.

Исследование продольной микроволновой неустойчивости для номинального режима компрессии пучка ЛУ [5,9] показало, что данный тип неустойчивости полностью отсутствует к моменту вывода пучка из накопителя. Однако в процессе накопления некоторые гармоники продольной плотности заряда имеют постоянные времена роста не менее 10 мс. Значения мнимой и действительной составляющих продольного импеданса для накопителя протонов оцениваются $\text{Im}Z_L/n \approx 370 \Omega$, $\text{Re}Z_L/n \approx 5 \Omega$, где n – номер гармоники. При условии $\text{Re}Z_L/n \ll \text{Im}Z_L/n$ закон масштабирования постоянных времени роста [5] при произвольной энергии W

$$k_r = \frac{\tau(\omega)_{600}}{\tau(\omega)_W} = \left(\frac{\beta_{600}}{\beta_W} \right) \cdot \left[\frac{(\gamma/\eta \bar{I}_c)_{600}}{(\gamma/\eta \bar{I}_c)_W} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{(\beta \gamma^2)_W}{(\beta \gamma^2)_{600}} \right]^{1/2}$$

В исследуемом диапазоне энергий ЛУ для спектра пространственных гармоник накопленного пучка $k_r \leq 22$. С уменьшением энергии пучка в накопителе вероятность развития продольной микроволновой неустойчивости возрастает. Однако, учитывая результаты численного моделирования номинального режима работы накопителя [9], возможные постоянные времена нарастания амплитуд пространственных гармоник продольной плотности значительно больше времени циркуляции пучка в накопителе.

Моделирование поперечной микроволновой неустойчивости производилось для случая циркуляции непрерывного пучка в накопителе [10], [11]. Наиболее опасные низкочастотные гармоники поперечного дипольного момента тока накопленного пучка имели постоянные времена нарастания более 1 мс. Для конкретной энергии ЛУ требуется проведение моделирования с уточнением ряда характерных параметров установки: хроматичности и возможности ее коррекции, характеристик камеры накопителя.

Электрон-протонная неустойчивость исследовалась для циркуляции непрерывного пучка в накопителе [12] при номинальной энергии ЛУ в течение ~ 10 мс. Показано, что при соответствующем размещении электродов, собирающих свободные электро-

ны, данный вид неустойчивости не возникает. Для исследуемого режима компрессии при наличии абсолютно свободного от частиц промежутка в циркулирующем пучке, данный вид неустойчивости отсутствует [13]. Наличие незначительного числа протонов в данном промежутке может привести к возникновению когерентных колебаний накопленного сгустка [13]. Поэтому обязательно наличие свободного промежутка с учетом всевозможных процессов “расплывания” циркулирующего сгустка. В этом случае данный тип неустойчивости не представляет опасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что при энергии пучка ЛУ значительно меньшей номинального значения возможно получение из накопителя протонов ИЯИ РАН коротких (350...500) нс сгустков со средним током более 1 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Севергин, И.А. Шукейло. Компрессия импульса тока Московской мезонной фабрики // *Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий*. Новосибирск, 1987, т.1, с.277-279.
2. Г. Брук. *Циклические ускорители заряженных частиц*. Москва: «Атомиздат», 1970.
3. V.A. Moiseev, P.N. Ostroumov. Longitudinal Dynamics Simulation of the High Intensity Beam in the MMF Storage Ring // *Proceedings of the European Particle Accelerator Conference*. Nice, France, 1990, v.2, p.1714-1716.
4. И.М. Капчинский. *Теория линейных резонансных ускорителей*. Москва: «Атомиздат», 1982.
5. V.A. Moiseev, P.N. Ostroumov, O.V. Ponomarev, Yu.P. Severgin, M.G. Nagaenko. Beam Dynamics

- Studies in the Moscow Meson Factory Storage Ring// *Proceedings of the European Particle Accelerator Conference*. Nice, France, 1990, v.2, p.1673-1675.
6. A. Hoffman. Tune Shifts from Self-Fields and Images // *CAS*. Geneva, 1994, v.1, p.329-348.
 7. В.А. Моисеев, П.Н. Остроумов, Ю.П. Севергин. Кулоновские эффекты в накопителе протонов Московской мезонной фабрики // *Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна, 1987, т.1, с.411-415.
 8. A. Hofmann. Single-Beam Collective Phenomena // *Theoretical aspects of the behaviour of beams in accelerators and storage rings*. Geneva. 1977, p.139-174.
 9. В.А. Моисеев, П.Н. Остроумов. Моделирование продольной динамики сильноточного пучка в накопителе протонов Московской мезонной фабрики // *Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна, 1992, т.2, с.181-184.
 10. В.А. Моисеев. *Метод моделирования поперечной фазовой динамики интенсивных ионных пучков в циклических ускорителях*: Препринт ИЯИ-898/95, 1995.
 11. V.A. Moiseev. The Longitudinal and Transverse Beam Dynamics Simulation in the MMF Storage Ring// *Proceedings of the 1993 IEEE Particle Accelerator Conference*. Washington, 1993, v.5, p.3249-3251.
 12. В.А. Моисеев. *К вопросу о e-p неустойчивости в накопителе протонов Московской мезонной фабрики*: Препринт ИЯИ-841/94, 1994.
 13. D. Neuffer. Calculations of the Conditions for Bunched-Beam e-p Instability in the Los Alamos Proton Storage Ring// *IEEE Particle Accelerator Conference*. San Francisco, 1991, v.2, p.1077-1079.

Статья поступила в редакцию 05.10.2007 г.

STUDY OF LOW ENERGY OPERATION FOR INR PROTON STORAGE RING

V.A. Moiseev

The INR Proton Storage Ring (PSR) was designed to adjust 600 MeV linac beam for the experimental tasks. The modern state of INR linac permits to produce the beam with essentially less energy (< 210 MeV) than project. The study of PSR operation and beam dynamics for lower injection energy has been done.

ВИВЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ РОБОТИ НАКОПИЧУВАЧА ПРОТОНІВ ІЯД РАН ПРИ НИЗЬКИХ ЕНЕРГІЯХ

V.A. Moiseev

Накопичувач протонів ІЯД РАН був розроблений для перетворення 600 MeV пучку лінійного прискорювача для експериментальних завдань. Сучасний стан прискорювача ІЯД РАН дозволяє робити пучок частинок з істотно меншою, чим проектна, енергією (< 210 MeV). Наведено результати дослідження роботи накопичувача і динаміки пучку в ньому для низьких значень енергії інжекції.