

УДК: 539.172 PACS: 29.20.Dh, 29.27.Bd

## ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В НАКОПИТЕЛЕ НЕСТОР ОТ ДАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА

П.И. Гладких, В.Г. Гревцев, А.Ю. Зелинский, И.М. Карнаухов, Н.И. Мочешников,  
А.О. Мыцыков

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

Поступила в редакцию 30 апреля 2007 г.

Рассмотрены основные механизмы потерь накопленных частиц: упругое и неупругое рассеяние на электронах и ядрах атомов остаточного газа, внутривидовое рассеяние (эффект Тушека), квантовое время жизни в накопителе электронов НЕСТОР (Н-100М), который создается в ННЦ ХФТИ для генерации интенсивного пучка гамма-квантов на основе обратного комптоновского рассеяния. Показано, что в области низких энергий электронного пучка основные потери накопленного пучка происходят из-за упругого рассеяния частиц на ядрах, а в области высоких энергий преобладают эффекты неупругого рассеяния. Построены зависимости парциальных и суммарного времени жизни от энергии электронного пучка. Найдена величина максимального накопленного тока, исходя из времени жизни электронного пучка. Определены апертура вакуумной камеры и величина динамического давления в накопителе.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** время жизни, электронный пучок, накопитель электронов, вакуумная камера, остаточный газ.

В накопителе электронов НЕСТОР (Н-100М), который создается в ННЦ ХФТИ для генерации интенсивного пучка гамма-квантов при обратном комптоновском рассеянии [1], время жизни циркулирующего пучка электронов при энергии 60 МэВ должно быть не менее 0,5 часа, а при более высокой энергии 250 МэВ – не менее 2 часов. Для этого среднее динамическое давление в присутствии пучков электронов и синхротронного излучения должно быть не выше  $5 \cdot 10^{-9}$  Торр.

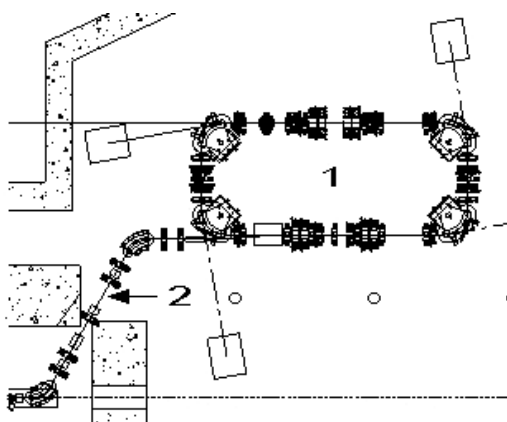


Рис. 1. Схема вакуумной и электромагнитной систем накопительного кольца и инжекционного канала

1 – накопительное кольцо;  
2 – инжекционный канал

Вакуумная система накопительного кольца и инжекционного канала (рис.1) должна обеспечить транспортировку пучка от линейного ускорителя, накопление необходимого тока и долговременное удержание накопленного пучка в кольце с минимальными потерями частиц.

Целью работы является выработка требований к вакуумной системе инжекционного канала и накопительного кольца, вытекающие из результатов моделирования динамики электронного пучка в этих каналах.

### ИНЖЕКЦИОННЫЙ КАНАЛ

Вакуумная система инжекционного канала должна обеспечить транспортировку пучка без потерь от выхода линейного ускорителя через канал параллельного переноса и коллиматор до ударного магнита накопителя. С целью унификации вакуумного оборудования крайне желательно, чтобы апертуры вакуумпроводов инжекционного канала и регулярных частей накопительного кольца были согласованы. В связи с существенным различием в величине давления остаточного газа в линейном ускорителе-инжекторе для

комплекса НЕСТОР ( $p \geq 4 \cdot 10^{-7}$  Торр) и в накопительном кольце ( $p \leq 1 \cdot 10^{-9}$  Торр) вакуумная система канала транспортировки должна обеспечить дифференциальную откачку вакуумных объемов для согласования рабочих давлений установки. Таким образом, можно сформулировать два основных требования к вакуумной системе канала транспортировки:

- Апертура вакуумной системы должна учитывать динамику электронного пучка в накопителе и обеспечивать его транспортировку через вакуумный объем без потерь частиц. Должно быть принято во внимание влияние неточностей установки электромагнитных элементов на положение равновесной орбиты пучка в канале транспортировки.
- Расположение и параметры вакуумного оборудования в канале транспортировки должно обеспечивать дифференциальную откачку вакуумного объема от давления  $p \geq 4 \cdot 10^{-7}$  Торр до давления  $p \sim 1 \cdot 10^{-9}$  Торр с учетом вакуумной проводимости выбранного вакуумпровода и геометрии коллиматора, расположенного на канале транспортировки.

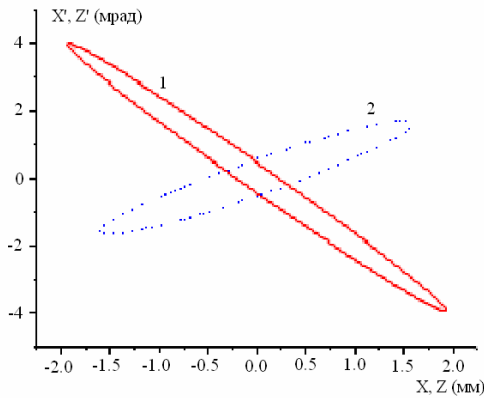


Рис. 2. Фазовые портреты инжектируемого пучка на входе в накопительное кольцо комплекса НЕСТОР  
1 - в радиальной плоскости,  
2 - в вертикальной плоскости.

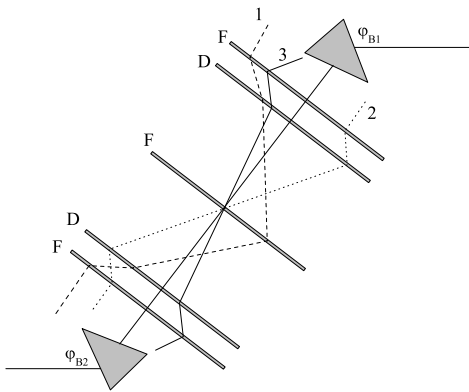


Рис. 3. Ход лучей в пятилинзовой схеме параллельного переноса

- 1 - горизонтальная огибающая пучка,
- 2 - вертикальная огибающая пучка,
- 3 - дисперсионная функция,
- F – фокусирующая квадрупольная линза,
- D - дефокусирующая квадрупольная линза,
- B1, B2 – поворотные магниты.

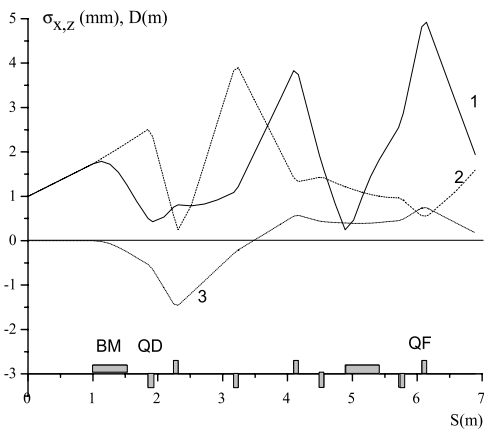


Рис. 4. Огибающие пучка в инжекционном канале накопителя НЕСТОР  
1 - горизонтальная огибающая пучка,  
2 - вертикальная огибающая пучка,  
3 - дисперсионная функция,  
BM – поворотный магнит,  
QF – фокусирующая квадрупольная линза,  
QD - дефокусирующая квадрупольная линза.

Требования к апертуре вакуумпровода канала транспортировки определяются из детального анализа динамики пучка в нем.

Канал транспортировки инжектируемого пучка реализуется в виде «почти» параллельного переноса пучка с углами поворота пучка в магнитах  $\varphi_{B1}$  и  $\varphi_{B2} = -\varphi_{B1} + \varphi_{inj}$ . В случае комплекса НЕСТОР углы поворота составляют  $\varphi_{B1} = 60^\circ$  и  $\varphi_{B2} = -60^\circ$ . Исходными данными для расчета являются параметры  $\sigma$ -матрицы на выходе электронного ускорителя  $\sigma_x = \sigma_z = 1$  мм,  $\sigma_x' = \sigma_z' = 1$  мрад и параметры  $\sigma$ -матрицы на входе в накопительное кольцо (рис. 2).

В качестве структуры фокусировки параллельного переноса выбран классический пятилинзовый вариант (рис. 3), обладающий гибкой фокусировкой. С помощью такой ахроматической системы можно получить фокусировку с линейными и угловыми увеличениями, равными  $\pm 1$  (так называемая I - оптика).

Дублет квадрупольных линз фокусирует в вертикальной плоскости параллельный пучок в центре центральной линзы и собирает траектории частиц с разными импульсами. В горизонтальной плоскости параллельный пучок фокусируется в промежутке между дублетом и центральной линзой (оптимальное место установки коллиматора - монохроматора). Центральная линза, называемая полевой, практически не влияет на траектории частиц с разными импульсами и на вертикальные траектории, но позволяет получить различные фокусирующие свойства системы в горизонтальной плоскости. В зависимости от конкретной задачи фокусировка в параллельном переносе может быть либо  $F-D-F-D-F$ , либо  $D-F-D-F-D$ . Второй тип обеспечивает лучшую фокусировку в вертикальной плоскости.

Оконечная часть инжекционного тракта, то есть инфлектор, квадрупольная линза накопителя и рассеянное поле магнита, через который проходит пучок после выхода из параллельного переноса, представляет собой дисперсионную систему. Следовательно, параллельный перенос должен компенсировать эту дисперсию, что является одним из условий его расчета. На рис. 4 приведены результаты расчета инжекционного канала для углов поворота в магнитах  $\varphi_{B1} = 60^\circ$ ,  $\varphi_{B2} = -60^\circ$  с фокусировкой, обеспечивающей согласование с окончательной частью инжекционного тракта [2]. Очевидно, что инжекционный тракт обеспечивает транспортировку пучка с требуемыми параметрами от выхода ускорителя к азимуту инжекции в накопительном кольце. Из рисунка видно, что максимальный среднеквадратичный размер пучка составляет 5 мм. Можно считать, что весь пучок будет сосредоточен в области 15 мм вокруг равновесной орбиты. Изменения в величину этой области могут внести искажения равновесной орбиты за счет неточностей юстировки электромагнитных элементов и нестабильности питания элементов.

Расчеты показали, что нестабильность питания вносит существенные искажения как в среднеквадратичный размер пучка, так и в дисперсионную функцию канала. Таким образом, размеры области, занимаемой инжектируемым пучком вдоль канала инжекции, не изменятся при величине стабильности питания, равной  $10^{-3}$ .

Были проведены расчеты с целью исследования влияния ошибок юстировки электромагнитных элементов на сдвиг центральной траектории пучка. Результаты расчетов показали, что при величине допусков на установку элементов, равных 200 мкм, максимально возможный сдвиг центроиды инжектируемого пучка не превышает 3 мм.

Таким образом, результаты расчета инжекционного канала показали, что апертура вакуумного тракта диаметром 38 мм обеспечит транспортировку инжекционного пучка от линейного ускорителя к накопительному кольцу без потерь. Такая структура вакуумпровода определяется из соображений апертур стандартного вакуумного оборудования, выпускаемого в мире, и является оптимальной с точки зрения стоимости канала.

### ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ

Чем дольше существует накопленный пучок в кольце, тем выше эффективность его использования. Количественной характеристикой потерь накопленного пучка является время жизни пучка  $\tau_{life}$ , в течение которого накопленное число частиц уменьшается в  $e$  раз:

$$N_e(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{life}}\right). \quad (1)$$

Есть несколько основных механизмов потерь накопленных частиц и практически все они в той или иной мере связаны с параметрами остаточного газа в вакуумной камере накопителя. При упругих столкновениях частиц накопленного пучка с атомами остаточного газа изменяется направление импульса, при этом частицы рассеиваются в поперечных плоскостях (радиальной и вертикальной) и теряются на стенках вакуумной камеры. Этот канал потерь характеризуется соответствующим временем жизни из-за упругого рассеяния накопленных частиц на ядрах остаточного газа  $\tau_{scat}$  [3,4]:

$$\frac{1}{\tau_{scat}} = \frac{4\pi r_e^2 Z^2 \rho c}{2\gamma^2} \left[ \frac{\langle \beta_x \rangle \beta_{xmax}}{a^2} + \frac{\langle \beta_z \rangle \beta_{zmax}}{b^2} \right], \quad (2)$$

где  $r_e$  – классический радиус электрона,  $\gamma$  – Лоренц-фактор,  $\rho$ ,  $Z$  – плотность и заряд ядер, соответственно,  $a$ ,  $b$  – горизонтальный и вертикальный полуразмеры вакуумной камеры,  $\beta_x$ ,  $\beta_z$  – горизонтальная и вертикальная амплитудные функции.

В выражении (2) предполагается интегрирование по всей орбите накопителя, на практике же обычно выполняется суммирование по отдельным элементам структуры фокусировки накопителя.

Накопленные частицы рассеиваются также и на электронных оболочках атомов остаточного газа, но, как показывает анализ, в рабочем диапазоне энергий накопителя НЕСТОР время жизни из-за рассеяний на электронах намного превосходит время жизни из-за рассеяний на ядрах.

При неупругих столкновениях изменяются импульс и энергия частицы. Время жизни из-за эффектов неупругого рассеяния определяется выражением [3,4]:

$$\frac{1}{\tau_{brem}} = \frac{16r_e^2 Z^2 \rho c}{411} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \left(-\ln \sigma_{RF} - \frac{5}{8}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{RF}$  – энергетический аксептанс накопительного кольца.

Если мы свяжем систему координат с движущимся пучком накопленных частиц, то в этой системе частицы будут совершать только поперечные (бетатронные) колебания. В процессе этих колебаний частицы рассеиваются одна на другой и получают продольную компоненту импульса. При столкновениях с большими переданными импульсами частицы могут попадать за область устойчивого движения в продольной плоскости, так называемую сепаратрису продольных (синхротронных) колебаний. После этого такие частицы выходят из режима автофазировки, теряют энергию и нейтрализуются на элементах вакуумной камеры (эффект Тушека). Этот эффект характеризуется соответствующим временем жизни  $\tau_T$ . Интенсивность потерь частиц в эффекте Тушека пропорциональна интенсивности столкновений, т.е. соотношениям объема и числа частиц в пучке, а объем пучка, в свою очередь, зависит от давления остаточного газа (при невысоких давлениях эта зависимость весьма существенна). Выражение для времени жизни по Тушеку имеет вид [5, 6]:

$$\frac{1}{\tau_T} = \frac{\sqrt{\pi} r_e^2 c N C(\zeta)}{\sigma_x' \gamma^3 \sigma_{RF}^2 V}, \quad (4)$$

где  $V = 8 \pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z$ ,  $\zeta = (\sigma_{RF} / \gamma \sigma_x')^2$ ,  $N$  – число частиц в одном электронном банче,

$$C(\zeta) = -\frac{3}{2} e^{-\zeta} + \frac{\zeta}{2} \int_{\zeta}^{\infty} \frac{\ln u}{u} e^{-u} du + \frac{1}{2} (3\zeta - \zeta \ln \zeta + 2) \int_{\zeta}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du.$$

Единственный канал потерь частиц, не зависящий от вакуумных условий в накопителе, определяется квантовым характером излучения (синхротронного и комптоновского) частиц. Эти потери характеризуются квантовым временем жизни [6]:

$$\tau_q = \frac{\tau_s}{2} \frac{e^{\xi}}{\xi}, \quad (5)$$

где  $\xi = \sigma_{RF}^2 / 2\sigma_{es}^2$ ,  $\tau_s$  – время затухания синхротронных колебаний,  $\sigma_e$  – установившийся энергетический разброс электронного пучка.

Полное время  $\tau_{tot}$  жизни определяются суммой всех парциальных времен

$$\frac{1}{\tau_{tot}} = \frac{1}{\tau_{scat}} + \frac{1}{\tau_{brem}} + \frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_q}. \tag{6}$$

Особенностью работы накопителя НЕСТОР является очень большой энергетический акцептанс ( $\sigma_{RF} = \pm 5\%$ ), необходимый для удержания электронного пучка с большим энергетическим разбросом, устанавливающимся при комптоновском рассеянии. Вследствие этого, время жизни по Тушеку и квантовое время жизни намного превосходят время жизни из-за упругих столкновений.

Анализ выражений (2) – (5) показывает, что в области низких энергий электронного пучка (до нескольких сотен МэВ) основные потери накопленного пучка происходят из-за упругого рассеяния частиц на ядрах, в области высоких энергий преобладают эффекты неупругого рассеяния. Из (2) видно, что чем больше апертура вакуумной камеры, тем больше время жизни. Поэтому максимальные значения поперечных размеров камеры определялись апертурами дипольных магнитов и многополюсных линз (квадрупольных, секступольных и т.д.). В нашем случае была выбрана для расчета вакуумная камера эллиптического сечения с полуосями  $a \cdot b = 26 \cdot 13 \text{ мм}^2$ . На рис. 5 - 8 приведены зависимости парциальных и суммарного времен жизни от энергии накопленного пучка для двух значений давления остаточного газа.

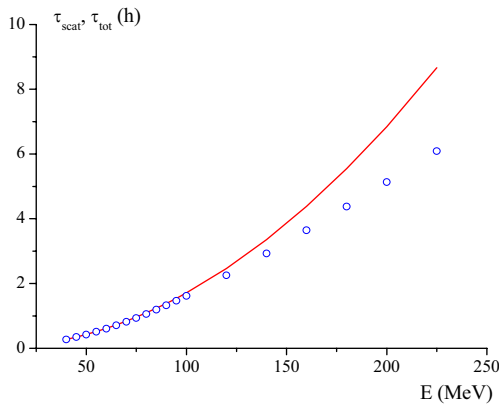


Рис.5. Время жизни из-за упругих столкновений (сплошная кривая) и суммарное время жизни для давления  $5 \cdot 10^{-9}$  Торр в рабочем диапазоне энергий электронного пучка. Апертура вакуумной камеры  $a \cdot b = 26 \cdot 13 \text{ мм}$ .

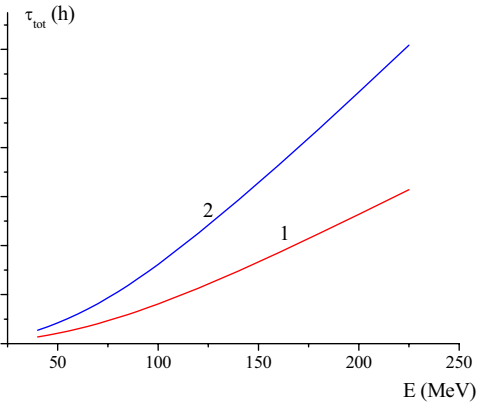


Рис.6. Суммарное время жизни для давлений  $5 \cdot 10^{-9}$  (2) и  $1 \cdot 10^{-8}$  (1) Торр в рабочем диапазоне энергий электронного пучка. Апертура вакуумной камеры  $a \cdot b = 26 \cdot 13 \text{ мм}$ .

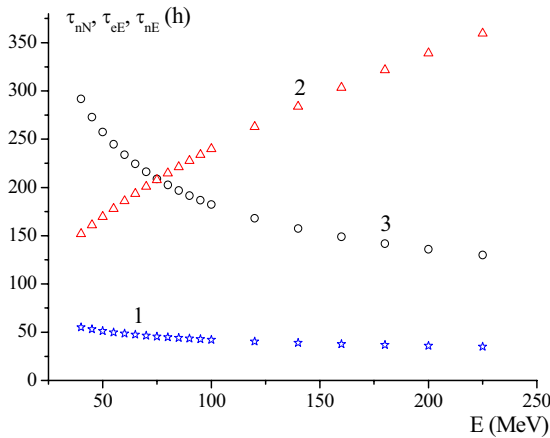


Рис.7. Парциальные времена жизни для давления  $1 \cdot 10^{-8}$  Торр из-за неупругих столкновений с ядрами (1), упругих и неупругих столкновений с электронами (2, 3) в рабочем диапазоне энергий электронного пучка. Апертура вакуумной камеры  $a \cdot b = 26 \cdot 13 \text{ мм}$ .

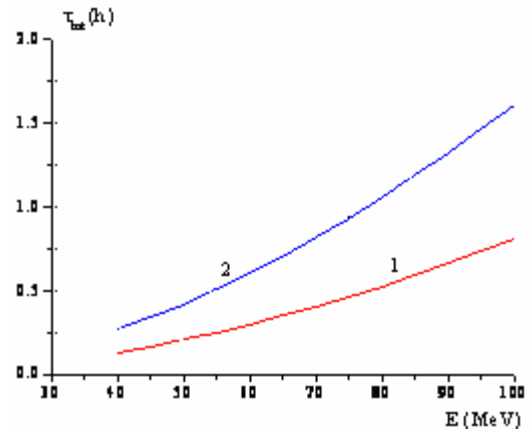


Рис.8. Суммарное время жизни для давлений  $5 \cdot 10^{-9}$  (2) и  $1 \cdot 10^{-8}$  (1) Торр в диапазоне энергий инжекции электронного пучка. Апертура вакуумной камеры  $a \cdot b = 26 \cdot 13 \text{ мм}$ .

**ВРЕМЯ ЖИЗНИ И МАКСИМАЛЬНЫЙ НАКОПЛЕННЫЙ ТОК**

Время жизни электронного пучка определяет величину максимального накопленного тока в накопителе. Из выражения (1) для малых отношений  $t / \tau_{tot}$  мы можем записать

$$I(t) = I_{max} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{life}}\right) \approx I_{max} \left(1 - \frac{t}{\tau_{life}}\right). \tag{7}$$

Пусть интервал между импульсами инжекции равен  $T_{inj}$ , тогда за время между импульсами инжекции накопленный ток уменьшится на величину

$$\Delta I = I_{max} \frac{T_{inj}}{\tau_{tot}}. \quad (8)$$

Это уменьшение тока должно быть не больше импульсного тока ускорителя – инжектора  $I_{inj}$ , откуда для максимального накопленного тока получим

$$I_{max} = I_{inj} \frac{\tau_{tot}}{T_{inj}}. \quad (9)$$

Максимальная частота инжекции определяется временем затухания бетатронных колебаний в плоскости инжекции. Для накопителя НЕСТОР на энергии инжекции  $E_{inj} = 60$  МэВ времена затухания  $\tau_x \approx \tau_y \approx 2,7$  с. При инжекции необходимо выдержать соотношение  $T_{inj} \geq 3 \tau_y$ , что определяет интервал между импульсами инжекции  $T_{inj} \approx 10$  с.

Из рис. 8 видно, что при среднем давлении в камере накопителя  $p = 1 \cdot 10^{-8}$  Торр и энергии инжекции  $E_{inj} = 60$  МэВ время жизни пучка  $\tau_{tot} \approx 18$  минут. При импульсном токе ускорителя  $I_{inj} = 25$  мА максимальный накопленный ток при стопроцентной эффективности инжекции  $I_{max} \approx 2,7$  А, что намного превосходит требуемую величину  $I_{stor} = 360$  мА (10 мА / банч).

### ПРОЕКТНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЕ

Исходя из изложенного выше, вакуумная система накопительного кольца должна обеспечить вакуум не хуже  $p = 5 \cdot 10^{-9}$  Торр. При таком давлении максимальный накопленный ток больше проектного. Время жизни пучка на энергии  $E = 43$  МэВ, на которой осуществляется генерация фотонов комптоновского излучения, необходимых для медицинских исследований по ангиографии, составляет примерно 7 минут. Такое время вполне достаточно для экспериментов.

Вакуумная система инжекционного канала должна обеспечить транспортировку пучка без потерь от выхода коллиматора до ударного магнита кольца. С целью унификации вакуумного оборудования апертуры инжекционного канала и регулярных частей накопительного кольца приняты согласованными. Как показывает моделирование динамики электронного пучка в инжекционном канале, такая апертура позволяет провести пучок без потерь к ударному магниту при принятых допусках на юстировку магнитных элементов канала.

### ВЫВОДЫ

1. Проведенные детальные расчеты канала транспортировки показали, что транспортировка электронного пучка от линейного ускорителя к накопителю без потерь может быть обеспечена вакуумпроводом диаметром 38 мм.
2. Анализ времени жизни пучка в накопителе НЕСТОР при апертуре вакуумпровода в виде эллипса с полуосями  $a \cdot b = 26 \cdot 13$  мм, которые определяются конструкцией поворотных магнитов и квадрупольных линз установки, показал, что основным каналом, определяющим время жизни пучка, является упругое рассеяние на ядрах остаточного газа.
3. Требуемое время жизни порядка 2 часов при энергии пучка 250 МэВ обеспечивается при давлении остаточного газа  $5 \cdot 10^{-9}$  Торр.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Androsov V., Agafonov A., Botman J.I., et al. X-ray generator-based-on-Compton scattering // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2005. - V.A 543. - P. 58-64.
2. Gladkikh P., Karnaukhov I., Mytsykov A., Zelinsky A. Injection system for Kharkov x-ray source Nestor // Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland. - P. 2038-2040.
3. Le Duff J. Current and current density limitations in existing electron storage ring // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1985. - V.A 239. - P. 83-101.
4. Piwinski A. Intra beam scattering // CERN Accelerator School Proceedings (Ed. S. Turner), CERN 87-03, (April 1987). - V. 1. - P. 402-415.
5. Le Duff J. Single and multiple Touschek effects // CERN Accelerator School Proceedings (Ed. S. Turner), CERN 89-01, (Feb 1989). - P. 114-130.
6. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. - М.: Атомиздат, 1970. -249 с.

### DEPENDENCE OF THE ELECTRON BEAM LIFETIME IN NESTOR STORAGE RING ON RESIDUAL GAS PRESSURE

**P.I. Gladkikh, V.G. Grevtsev, A.Yu. Zelinsky, I.M. Karnaukhov, N.I. Mocheshnikov, A.O. Mitsikov**

*National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", 1 Akademicheskaya St., Kharkov, UA-61108, Ukraine*

The main mechanisms of accumulated particles losses, such as elastic and inelastic scattering by electrons and nuclei of residual gas atoms; intrabeam scattering (Touschek effect), quantum life time in the electron storage ring NESTOR (N-100M) what construct in the NSC KIPT for generation of intensive X-Ray beam on the base of Compton scattering are considered. It is shown that the main losses of the accumulated beam in the area of low energies of the beam happen due to elastic particles scattering on nuclei, while in the field of high energies inelastic scattering effects prevail. Dependence of partial and total lifetimes on the energy of an electron beam is built. Vacuum chamber aperture and value of dynamic pressure are defined.

**KEY WORDS:** lifetime, electron beam, electron storage ring, vacuum chamber, residual gas.