

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ ПУЧКА НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

*В. Балакин^{а,1}, К. Астрелина^б, А. Петренко^б, Д. Беркаев^б,
Ф. Еманов^в, О. Мешков^в, В. Борин^в*

^а Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^б Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В связи со спецификой работы инжекционного комплекса ИЯФ СО РАН изучение коллективных эффектов пучка на накопителе-охладителе, входящем в состав комплекса, является актуальной задачей. Поэтому проведен ряд экспериментов по изучению коллективных эффектов: измерения продольного распределения частиц пучка стрик-камерой и электронно-оптическим диссектором как при инъекции в накопитель, так и при накоплении больших токов. Проведено моделирование процесса захвата пучка из линейного ускорителя в накопитель-охладитель, и выполнен расчет характерных параметров импеданса накопителя-охладителя. Полученные результаты представлены в статье.

In connection of Injection Complex work specifics, studying of beam collective effects on Damping ring is actual current task. That is why a number of beam collective effects researches, including longitudinal beam profile measurements during the injection (by streak-camera) and high current storing (by streak-camera and dissector), were carried out. Also we made simulations of beam capture process from linear accelerator to damping ring and estimated damping ring impedance parameters based on these experiments. Results of our research can be found in this paper.

PACS: 29.20.-c; 29.27.Bd

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы накопителя-охладителя (НО) инжекционного комплекса (ИК) ВЭПП-5 [1–3] определяется скоростью накопления частиц и параметрами пучка при его выпуске в транспортный канал К-500. В связи с этим актуальной задачей является изучение продольного движения частиц пучка при инъекции, продольного распределения частиц на выпуске и эффектов, влияющих на это распределение. Для ее решения проведен ряд исследований, направленных на изучение коллективных эффектов пучка в НО с использованием стрик-камеры [4] и электронно-оптического

¹E-mail: balakinvalyov@gmail.com

диссектора [5]. Кроме этого, для объяснения эффекта быстрой перегруппировки пучка из набора сгустков в один за время меньше одного синхротронного колебания провели моделирование процесса захвата пучка из линейного ускорителя в НО. Как итог, эти исследования помогли выяснить модель импеданса связи накопителя-охладителя и основные процессы, проявляющиеся при накоплении пучка.

ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА ЧАСТИЦ ИЗ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ В КОЛЬЦО НО

В процессе группировки и ускорения частиц в линейном ускорителе (ЛУ) происходит формирование 16-сгусткового пучка. На рис. 1 показан его продольный профиль, измеренный стрик-камерой.

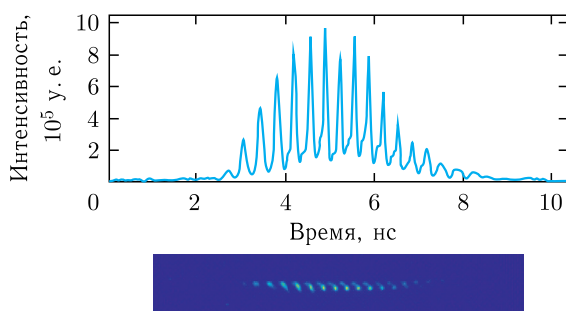


Рис. 1. Продольный профиль пучка, полученный на выходе линейного ускорителя

Попадая в потенциальную яму, образованную ускоряющим ВЧ-резонатором, работающим на первой гармонике частоты обращения, пучок начинает перегруппировываться, образуя один сгусток. Как показал эксперимент, характерное время перегруппировки составляет около 270 мкс (~ 3000 оборотов), что значительно меньше времени радиационного затухания пучка, равного 18 мс. Мы попытались найти объяснение этому несоответствию.

Для изучения эффекта влияния импеданса связи на продольную перегруппировку пучка в течение первых тысяч оборотов после инжекции было выполнено моделирование данного процесса. Программный код был реализован на языке программирования Python 3. Продольный импеданс задается как эквивалентный параллельный LRC-резонатор [6]:

$$Z = \frac{R_s}{1 + iQ \left(\frac{\omega_R}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_R} \right)} \quad (1)$$

с соответствующей ему wake-функцией

$$W(\varepsilon) = \begin{cases} 2\alpha R_s e^{\alpha\varepsilon/c} \left(\cos \frac{\omega_p \varepsilon}{c} + \frac{\alpha}{\omega_p} \sin \frac{\omega_p \varepsilon}{c} \right), & \varepsilon < 0, \\ \alpha R_s, & \varepsilon = 0, \\ 0, & \varepsilon > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\alpha = \omega_R/2Q$, $\omega_p = \sqrt{\omega_R^2 - \alpha^2}$, $\varepsilon = z - ct$.

Для оценки импеданса проводилась минимизация целевой функции φ , задаваемой как

$$\varphi = \sum^N (I_{\text{model}}(N, R_s, Q, \omega_r) - I_{\text{mes}}(N))^2, \quad (3)$$

где $I_{\text{model}}(N, R_s, Q, \omega_r)$ — смоделированное распределение тока пучка, зависящее от номера оборота и параметров эквивалентного импеданса связи; $I_{\text{mes}}(N)$ — измеренный стрик-камерой продольный профиль пучка на N -м обороте. Составив такую модельную функцию $\varphi = \sum^N (I_{\text{model}}(N, R_s, Q, \omega_r) - I_{\text{mes}}(N))^2$ (3) и найдя ее минимум, можно оценить эквивалентные параметры LRC-резонатора.

Рис. 2 иллюстрирует соответствие измеренного стрик-камерой профиля пучка и результата моделирования при наличии импеданса связи. Очевидно, что импеданс кольца и связанные с ним коллективные эффекты оказывают заметное влияние на продольную динамику пучка в кольце. Причина такого быстрого процесса перегруппировки пучка заключается в возникновении микроволновой неустойчивости, которая в фазовом пространстве смешивает между собой отдельные сгустки. Проявление микроволновой неустойчивости особенно четко видно на рис. 3. Ее характерная особенность — появление на профиле пучка модуляции плотности, которая уже никак не связана с начальным продольным распределением частиц, полученным при инъекции из ЛУ.

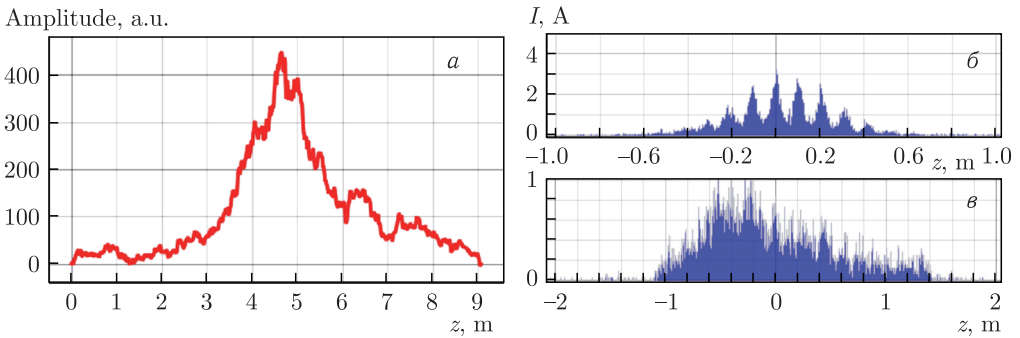


Рис. 2. Продольный профиль через 3200 оборотов: а) снятый стрик-камерой; б, в) результаты моделирования (б — без учета импеданса связи, в — с учетом)

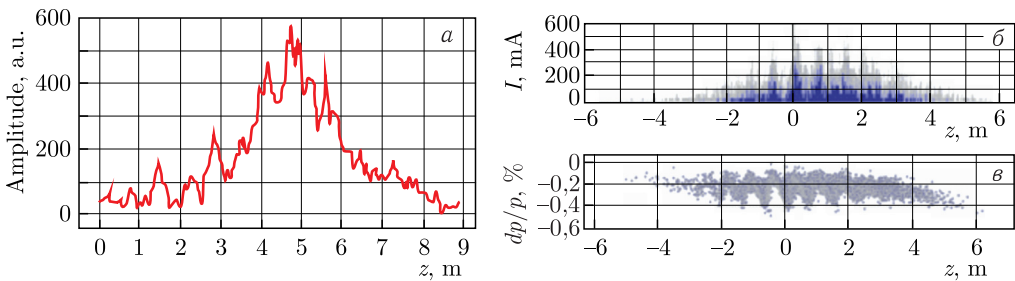


Рис. 3. Продольный профиль через 800 оборотов: а) снятый стрик-камерой; б, в) смоделированный, с учетом влияния импеданса

Параметры эквивалентного LRC-резонатора $Z = \frac{R_s}{1 + iQ(\omega_R/\omega - \omega/\omega_R)}$ (1), полученные минимизацией целевой функции $\varphi = \sum^N (I_{\text{model}}(N, R_s, Q, \omega_r) - I_{\text{mes}}(N))^2$ (3), составляют $R_s = 57$ кОм, $Q = 8,7$ и $\omega_R = 0,42$ ГГц.

Оцененный по параметрам накопителя-охладителя порог микроволновой неустойчивости составляет 1,62 А. Пиковый ток банчей пучка линейного ускорителя ($\sim 1,8$ А) превышает значение пикового тока порога микроволновой неустойчивости (при среднем инжектируемом токе 20 мА), поэтому динамика продольного профиля пучка после инжекции и определяется этой неустойчивостью.

УДЛИНЕНИЕ ПУЧКА И ИСКАЖЕНИЕ ЕГО ФОРМЫ

Максимальный пиковый ток стационарного пучка в НО ниже порога микроволновой неустойчивости. В таком случае удлинение пучка, искажение его формы и смещение синхронной фазы обуславливается искажением потенциальной ямы полями, наведенными пучком. В формализме импедансов связи для гауссового пучка его среднеквадратичная длина зависит от тока следующим образом:

$$\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right) - \frac{e}{\sqrt{2\pi}} \frac{\alpha I_b}{EQ_{s0}^2} \text{Im} \left(\frac{Z_{||}}{n}\right)_{\text{eff}} \left(\frac{R}{\sigma_{s0}}\right)^3 = 0, \quad (4)$$

где $Q_{s0}^2 = \left(\frac{\omega_s 0}{\omega_0}\right)^2 = \frac{\alpha n e V_{\text{RF}} |\cos \varphi_s|}{2\pi E}$; n – номер гармоники; E – энергия частиц; σ_{s0} – среднеквадратичная длина при нулевом токе пучка; α – коэффициент уплотнения орбит.

Смещение синхронной фазы из-за роста тока пучка определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi I_b}{V_0 \cos(\varphi_s)} \frac{\sqrt{2\pi}}{\omega_0 \sigma_s} \text{Re} \left(\frac{Z_{||}}{n}\right)_{\text{eff}}. \quad (5)$$

Искажение потенциальной ямы приводит не только к удлинению пучка, но также и к искажению формы его профиля в пределах высоких токов, при этом распределение плотности тока задается уравнением

$$\rho(s) = \frac{\sqrt{2/\pi} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_s^2}\right)}{\theta \sigma_s \left[\coth\left(\frac{\theta N}{2}\right) - \text{erf}\left(\frac{s}{\sqrt{2}\sigma_s}\right) \right]}, \quad (6)$$

где $\theta = r_0 S / \alpha \sigma_E^2 \gamma C$; $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$; C – периметр кольца; σ_s – энергетический разброс пучка. Полное описание процессов приведено в [7, 8].

На рис. 4 представлены зависимости среднеквадратичного размера пучка, измеренные стрик-камерой и диссектором, а также зависимость смещения синхронной фазы от тока.

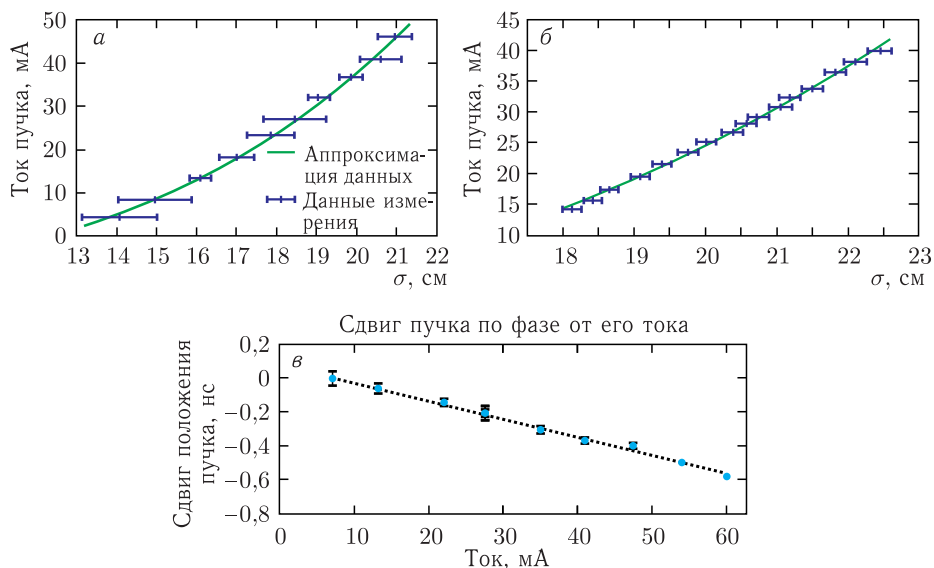


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной длины пучка от тока: а) измеренная стрик-камерой; б) измеренная диссектором; в) зависимость синхронной фазы от тока

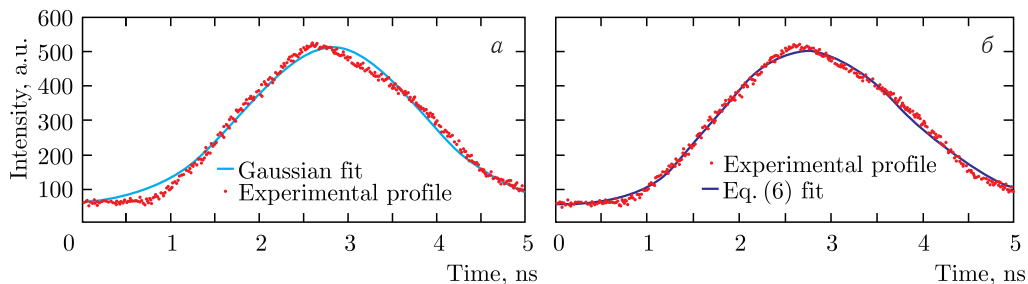


Рис. 5. Продольный профиль пучка при токе 160 мА, аппроксимированный функцией Гаусса (а) и модельной функцией (6) (б) при токе 170 мА

По измеренным данным значение $\text{Re}(Z_{||}/n)$ составляет $(15,68 \pm 0,47)$ Ом (диссектор), $\text{Im}(Z_{||}/n) - (5,71 \pm 0,5)$ Ом (диссектор), $(6,15 \pm 0,18)$ Ом (стрик-камера).

Искажение формы пучка наглядно продемонстрировано на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены продольная динамика пучка при его инжекции из ЛУ в накопитель, удлинение пучка, искажение его формы и смещение синхронной фазы из-за искажения потенциальной ямы. Также объяснен феномен быстрой перегруппировки пучка, определены условия возникновения микроволновой неустойчивости и оценены импеданс связи НО и параметры эквивалентного представления импеданса в виде параллельного LRC-резонатора.

Благодарности. Авторы благодарят Е. А. Переведенцева за помощь и консультации во время работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maltseva Yu. I. et al.* VEPP-5 Injection Complex Performance Improvement for Two Collider Operation // Proc. of RuPAC'18, Protvino, Russia, 2018; doi:10.18429/JACoW-RUPAC-2018-TUZMH02.
2. *Еманов Ф. А. и др.* Статус и перспективы инжекционного комплекса ВЭПП-5 // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 624–629.
3. *Maltseva Yu. et al.* VEPP-5 Injection Complex: New Possibilities for BINP Electron-Positron Colliders // Proc. of IPAC'18, Vancouver, Canada, 2018. Paper MOPMK011; doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-MOPMK011.
4. *Анчугов О. и др.* // Автометрия. 2016. Т. 52, № 3. С. 108.
5. *Vereschagin A. K. et al.* Recording the Synchrotron Radiation by a Picosecond Streak-Camera for Bunch Diagnostics in Cyclic Accelerators // Quant. Electron. 2016. V. 46. P. 185.
6. *Chao A.* Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators. Ch. 2. Dallas: Wiley-Interscience Publ. "John Wiley & Sons, Inc.", 1993. 384 p.
7. *Bane K.* Bunch Lengthening in the SLC Damping Rings. SLAC-PUB-5177. 1990. 54 p.
8. *Chao A.* Handbook of Accelerator Physics and Engineering. New Jersey: World Sci. Publ. Co. Pre. Ltd., 2013. 81 p.