

## НАСТРОЙКА МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ ВЭПП-5

*P. З. Мамутов<sup>a, б, 1</sup>, Г. Н. Барапов<sup>a, б</sup>, В. В. Балакин<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>б</sup> Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»

Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, 630559, Россия

Представлены результаты коррекции магнитной структуры накопителя-охладителя ВЭПП-5. Подготовлена новая целевая модель кольца с частотной рабочей точкой, отличной от старой модели. Проведена коррекция оптики к новой структуре, и получена калиброванная модель кольца. Скорректирована горизонтальная орбита в пикапах, относительно этой орбиты измерены поперечные смещения магнитной оси квадрупольных линз.

The results of the magnetic structure correction for the VEPP-5 damping ring are presented. A new target model of the ring with a working tune point, different from the old model, is prepared. The optics were corrected to match the new structure, and a calibrated model of the ring is obtained. The horizontal orbit in the BPMs was corrected, and transverse shifts of the quadrupole lens magnetic axis relative to this orbit are measured.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

### ВВЕДЕНИЕ

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 [1], расположенный в ИЯФ СО РАН, производит и поставляет пучки электронов и позитронов к двум действующим ускорительным комплексам (ВЭПП-2000 [2] и ВЭПП-4 [3]) по транспортному каналу К-500 (рис. 1). Пользователи и проводимые ими исследования напрямую зависят от эффективности и стабильности такой установки, которая, в свою очередь, в большой степени определяется качеством магнитной структуры кольца. Поэтому контроль состояния магнитооптической структуры и ее коррекция крайне актуальны и необходимы.

Один из надежных способов настройки структуры основан на анализе откликов замкнутой орбиты пучка на воздействие дипольными корректорами [4]. Более оперативный контроль оптики ускорителя осуществляется с помощью анализа пообразовых колебаний пучка [5], регистрируемых датчиками положения пучка (ДПП). При наличии целевой модели ускорителя возможно восстановить текущую магнитную структуру и скорректировать ее, задав необходимую конфигурацию токов магнитов. Кроме того, по анализу откликов орбиты можно сделать вывод о физической выставке магнитных элементов и впоследствии восстановить уже орбиту пучка, тем самым получить полную калиброванную модель, учитывающую и ошибки полей, и ошибки выставки элементов.

---

<sup>1</sup>E-mail: R.Mamutov@inp.nsk.su

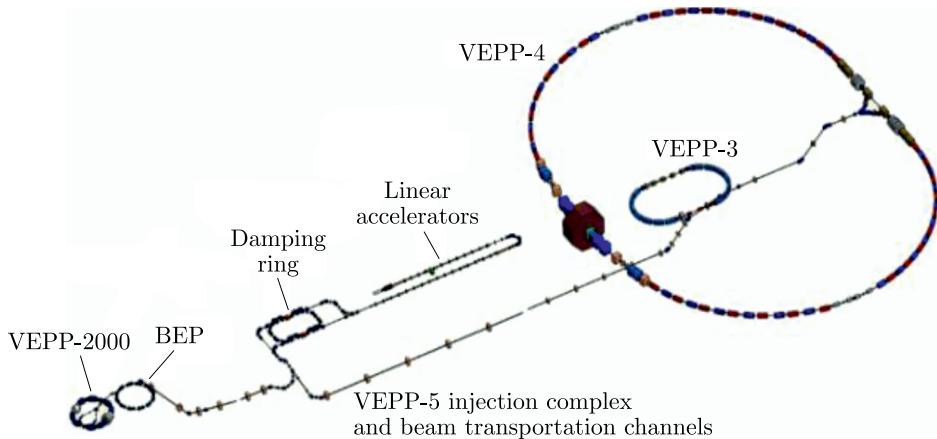


Рис. 1. Схема ускорительных комплексов ИЯФ СО РАН

## ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ

Метод LOCO (Linear Optics from Closed Orbits) является мощным инструментом для анализа и коррекции линейной оптики в ускорителях частиц. Основная цель метода заключается в том, чтобы минимизировать различия между модельными и измеренными орбитами пучка в накопителе. LOCO позволяет скорректировать линейные параметры оптики, такие как квадрупольные градиенты, что приводит к улучшению соответствия между моделью и реальной установкой.

Измерения замкнутых орбит проводятся при небольших изменениях в токах магнитных элементов кольца, таких как квадрупольные или дипольные магниты. Эти изменения приводят к возмущениям орбиты, которые затем фиксируются на датчиках положения пучка. Возмущение орбиты от дипольного корректора можно описать следующей формулой:

$$\frac{\Delta r_i}{\Delta \theta_j} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2 \sin \pi \nu} \cos(|\phi_i - \phi_j| - \pi \nu) - \frac{\eta_i \eta_j}{\alpha_c L}, \quad (1)$$

где  $\Delta r = \{\Delta x; \Delta y\}$  — горизонтальные и вертикальные искажения замкнутой орбиты соответственно;  $\phi_{i,j}$ ,  $\beta_{i,j}$  и  $\eta_{i,j}$  соответствуют набегу фаз, бетатронным функциям, дисперсии соответственно в месте ДПП с номером  $i$  и корректоре с номером  $j$ ;  $\nu$  — бетатронная частота;  $\alpha_c$  соответствует коэффициенту уплотнения орбит;  $L$  — это периметр ускорителя.

Таким образом, полная матрица откликов орбиты выглядит как

$$M = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Сравнив модельную и измеренную матрицы, можно сделать вывод о состоянии магнитной структуры. Однако для ее полного анализа необходимо также знать физическое положение магнитных элементов, поскольку смещенный магнит оказывает влияние на динамику пучка и искажает оптику.

В случае если орбита пучка проходит не по центру магнитной оси квадрупольной линзы и смещена на величину  $x_q$ , то линза вносит дополнительное искажение

орбиты [6] по аналогии с (1):

$$\frac{\Delta r_i}{\Delta k_j l_q x_q} = \frac{1}{1 \mp k_j l_q \left( \beta_j / (2 \tan \pi \nu) - \frac{\eta_j^2}{\alpha_c L} \right)} \times \\ \times \left( \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2 \sin \pi \nu} \cos(|\phi_i - \phi_j| - \pi \nu) - \frac{\eta_i \eta_j}{\alpha_c L} \right), \quad (3)$$

где  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\phi$  — значения бета-функции, дисперсии и набега фазы;  $l_q$ ,  $k$  — длина и нормированный на энергию градиент квадруполя;  $\Delta k$  соответствует изменению градиента;  $\nu$  — бетатронная частота;  $\mp$  соответствует горизонтальному и вертикальному возмущению соответственно;  $\alpha_c$  соответствует коэффициенту уплотнения орбит;  $L$  — периметр ускорителя; индексы  $i$  и  $j$  соответствуют номерам ДПП и квадруполя.

Таким образом строится матрица откликов орбиты, которая описывает, как изменения в магнитных элементах влияют на положение пучка в различных точках кольца. Далее происходит минимизация разницы между измеренной и расчетной матрицами путем варьирования параметров элементов модели. На основе результатов подгонки производится коррекция токов в магнитах для достижения наилучшего соответствия между моделью и реальной структурой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕКЦИИ ОПТИКИ

Была подготовлена целевая модель с новыми оптическими функциями и рабочей точкой для накопителя-охладителя ВЭПП-5 (рис. 2). Такой выбор обусловлен отдаленностью от резонансов, а также уменьшенной дисперсией в местах инжекции и выпуска. Кроме того, новая модель учитывает реальное расположение линз, что делает ее более близкой к реальной структуре кольца. Такое уточнение важно, поскольку если модель сильно расходится с действительной структурой, то аппроксимировать ее может быть принципиально невозможно. Оптические функции моделей кольца представлены на рис. 3.

Из пооборотных колебаний пучка были получены бетатронные частоты — рабочая точка представлена на рис. 4. Видно расхождение со старой целевой моделью. Понятно, что переход в нужный квадрант невозможен за счет индивидуальных обмоток коррекции градиента линз, поскольку они имеют предельный ток 10 А.

Таким образом, была сделана «ручка» для управления шестью основными источниками питания семейств квадрупольных линз. Соотношение между бетатронными частотами и токами описывается формулой

$$\begin{pmatrix} \Delta Q_x \\ \Delta Q_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,00186 & -0,00102 & -0,00089 & 0,00595 & 0,00242 & 0,00326 \\ 0,00221 & 0,00244 & 0,00301 & -0,00261 & -0,00105 & -0,00002 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \Delta I_{d1} \\ \Delta I_{d2} \\ \Delta I_{d3} \\ \Delta I_{f1} \\ \Delta I_{f3} \\ \Delta I_{f4} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

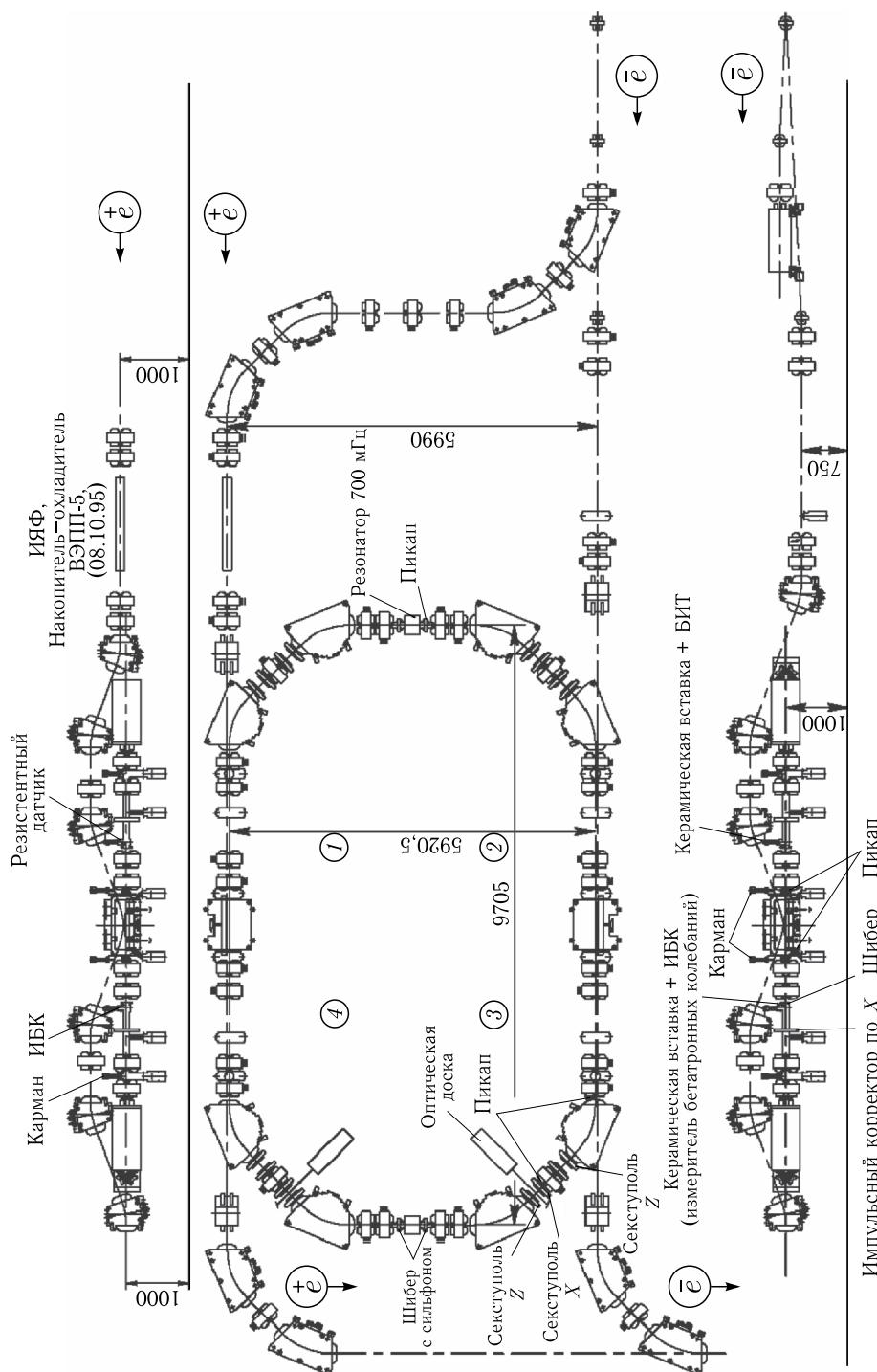


Рис. 2. Схема накопителя-охладителя ВЭПП-5

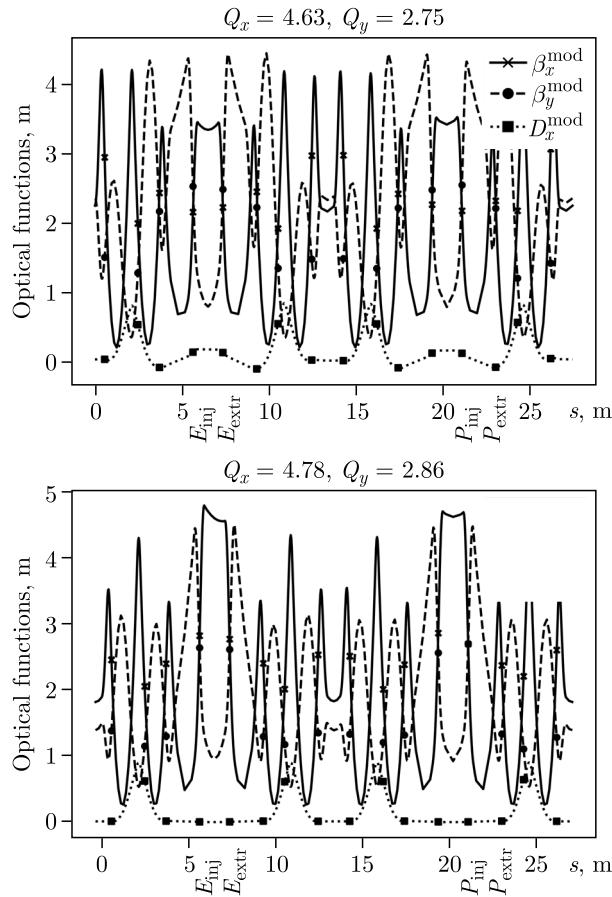


Рис. 3. Оптические функции для старой (сверху) и новой (снизу) моделей кольца. Точками указаны значения в датчиках положений пучка

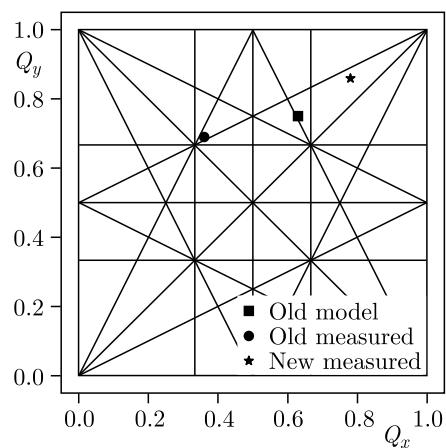


Рис. 4. Частотная диаграмма и рабочие точки кольца

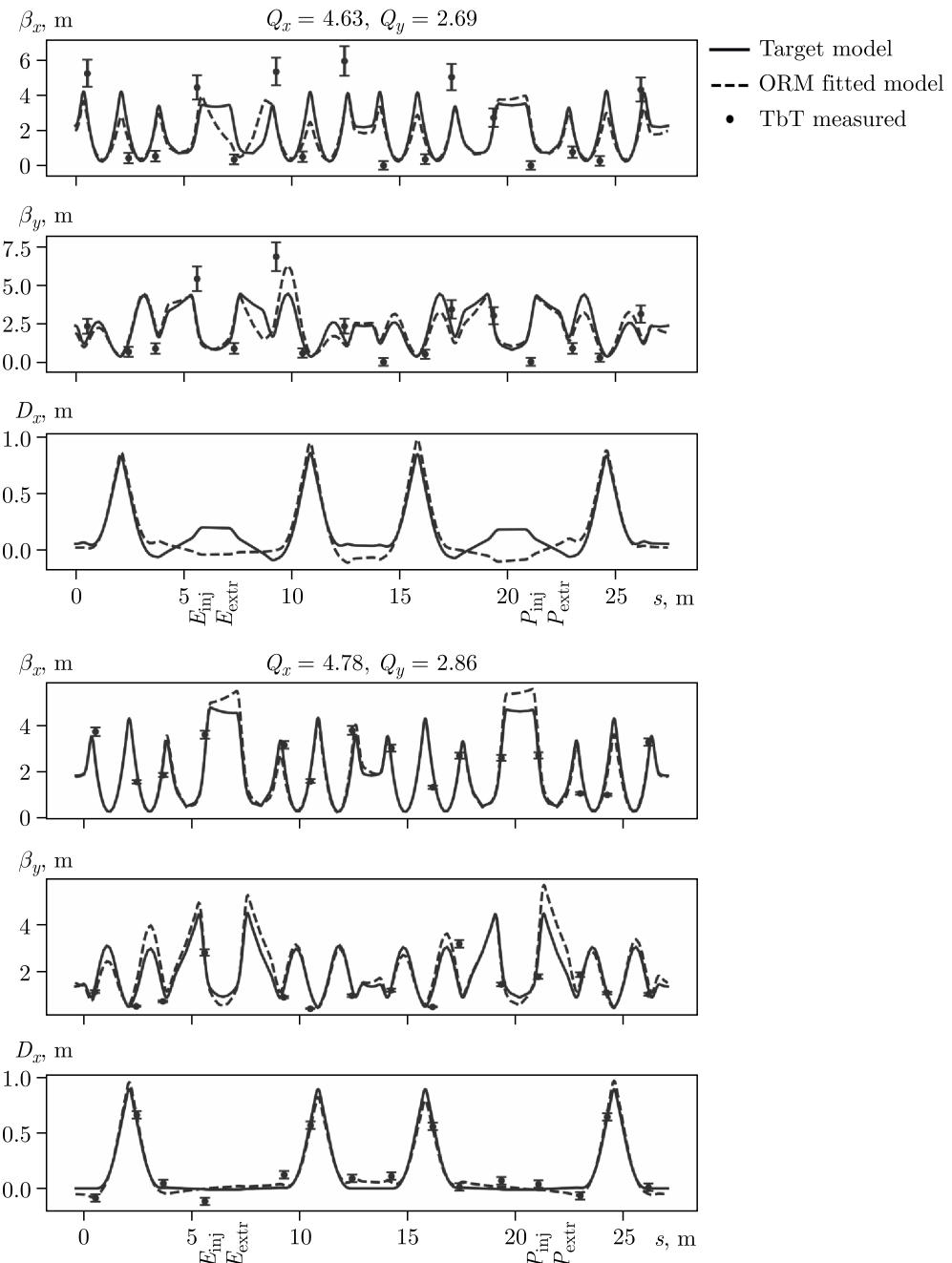


Рис. 5. Оптические функции до (сверху) и после (снизу) коррекции. Точками указаны значения в датчиках положений пучка

Это позволило сделать грубый переход в искомую рабочую частотную зону. Максимальное изменение в токах достигало 200 А.

Далее для анализа структуры измерялись матрица размера  $36 \times 32$  и дисперсия орбит. В качестве параметров для варьирования модели были выбраны коэффициенты масштаба корректоров и мониторов, а также градиенты квадрупольных линз. На рис. 5 представлены оптические функции до начала коррекции и после перехода по частотам и двух итераций более тонкой коррекции. Тонкая настройка осуществлялась за счет индивидуальных обмоток коррекций градиентов линз. Отчетливо видны

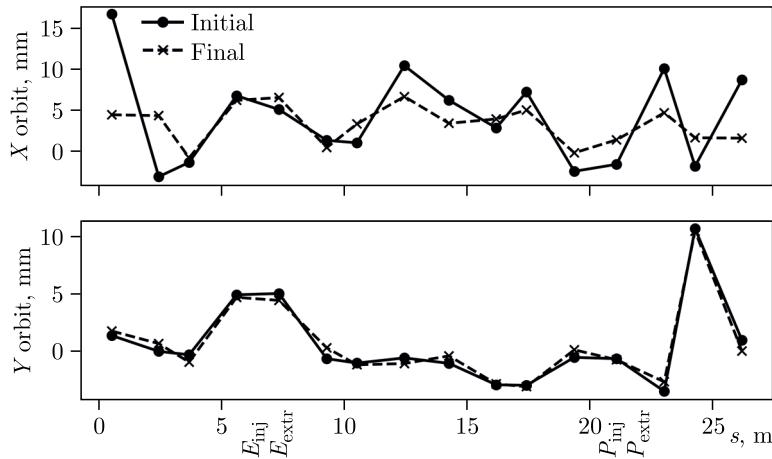


Рис. 6. Орбита пучка до и после коррекции. Погрешности измерений меньше размера точек

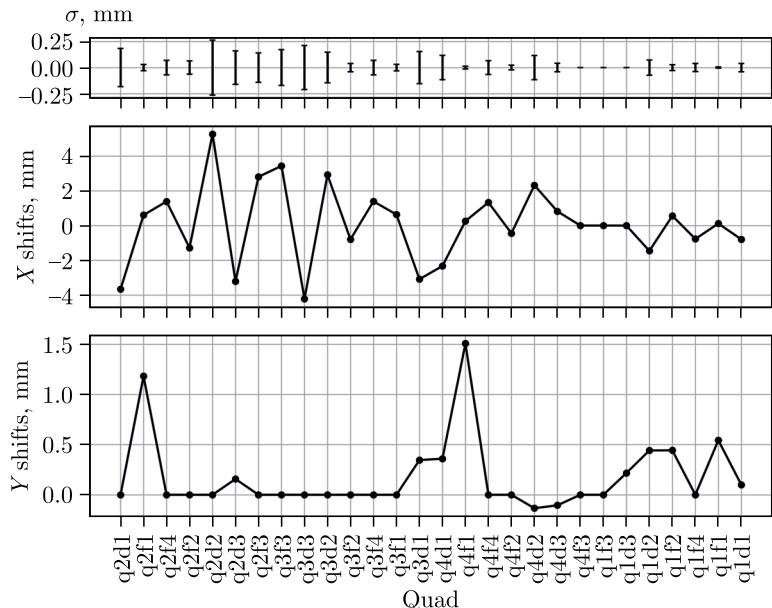


Рис. 7. Поперечные смещения магнитных осей квадрупольных линз относительно новой замкнутой орбиты

начальные расхождения в оптике. После коррекции измерения согласуются с модельными значениями.

Одновременно с внесением поправок осуществлялся контроль и коррекция орбиты пучка. Как правило, коррекции оптики и орбиты неразделимы, поскольку из-за «feed-down» эффектов [7] изменения в оптике изменяют орбиту пучка. Поэтому итеративно, после изменения токов квадрупольей, вносились поправки в токи корректоров с целью уменьшить отклонение орбиты в датчиках положения пучка и при этом сохранить инжекцию и накопление. В итоге горизонтальная орбита была уменьшена в среднем в два раза, а вертикальная не менялась, обе представлены на рис. 6.

Относительно новой равновесной орбиты были также измерены поперечные смещения магнитных осей квадрупольных линз. Для каждой линзы измерялось иска-

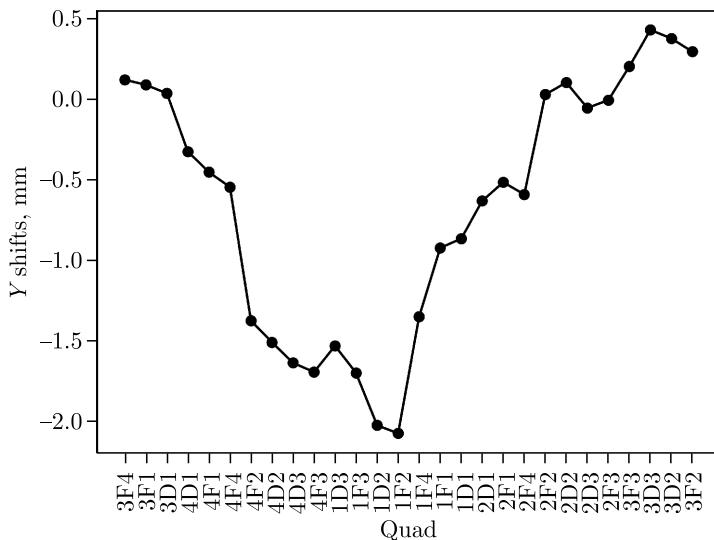


Рис. 8. Вертикальные геодезические смещения квадрупольных линз относительно геодезической плоскости

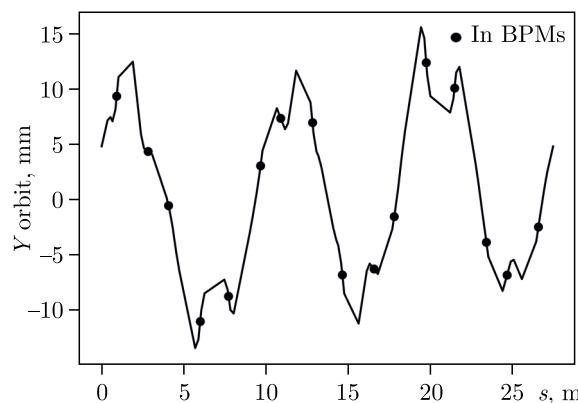


Рис. 9. Вертикальная орбита пучка в модели, вызванная геодезическими смещениями квадрупольных линз

жение орбиты при изменении тока  $\pm 0,5$  А, и далее с помощью модельно-зависимого анализа находились смещения. Результаты представлены на рис. 7. Такие отклонения могут существенно искажать замкнутую орбиту и нагружать дипольные коррекции. На рис. 8 показаны геодезические вертикальные смещения квадруполей относительно вертикальной геодезической плоскости. Данные сдвиги были внесены в модель, искаженная таким образом вертикальная орбита изображена на рис. 9. Очевидно, что дальнейшее уменьшение орбиты возможно после перевыставки квадрупольных линз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлен переход к новой оптической структуре накопителя-охладителя ВЭПП-5. Были скорректированы оптические функции. Необходимо сделать больше итераций для более тонкой коррекции оптики. Кроме того, была скорректирована орбита пучка, и измерены поперечные смещения магнитных осей квадруполей относительно новой равновесной орбиты. В дальнейшем планируется провести перевыставку линз, чтобы дальше оптимизировать орбиту пучка и настроить инжекцию и выпуск. По итогу предполагается получить единый режим работы для позитронов и электронов с одной магнитной структурой.

**Благодарности.** Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и правительства Новосибирской области Российской Федерации (грант РНФ № 22-12-20025 «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами»). Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦПК «СКИФ» Института катализа СО РАН (проект FWUR-2025-0004).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Emanov F., Astrelina K., Balakin V., Belikov O., Berkaev D., Boimelshtain Y.M., Bolkhovityanov D.Y., Frolov A., Karpov G., Kasaev A. et al. VEPP-5 Injection Complex // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 4. P. 754–756.
2. Rastigeev S., Aktershev Y. S., Bedarev E., Belikov O., Berkaev D., Burenkov D., Denisov V., Fomin L., Gorchakov K., Karpov G. et al. Recent Progress in the VEPP-2000 Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 4. P. 866–871.
3. Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V., Borin V. M., Dorokhov V. L., Karnaev S. E., Karyukina K. Yu., Kiselev V. A., Levichev E. B., Meshkov O. I. et al. VEPP-4M Collider Operation at High Energy // 12th Intern. Conf. on Part. Accel. 2021. P. 155–158.
4. Safranek J. Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 388, No. 1–2. P. 27–36.
5. Alexahin Y., Gianfelice-Wendt E. Determination of Linear Optics Functions from Turn-by-Turn Data // J. Instrum. 2011. V. 6, No. 10. P. P10006.
6. Kim K., Huang J., Ko I. The Beam Based Alignment Technique for the Measurements of Beam Position Monitors Offsets and Beam Offsets from Quadrupoles in the Pohang Light Source // Japan. J. Appl. Phys. 1999. V. 38, No. 12R. P. 6926.
7. Wenninger J. Linear Imperfections. arXiv:2004.14001. 2020.

Получено 28 октября 2024 г.