

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6.01

### МАСШТАБИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СИНХРОТРОНА “СИЛА”

© 2024 г. В. С. Дюбков<sup>a, b, \*</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: vsdyubkov@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 26.06.2023 г.

Принята к публикации 03.07.2023 г.

Произведено масштабирование магнитной структуры накопительного электронного синхротрона “СИЛА” на энергию 6 ГэВ четвертого поколения создаваемого на базе НИЦ “Курчатовский институт”. Рассчитаны параметры накопительного синхротрона, обеспечивающие проектные параметры электронных пучков в нем. Определены динамическая апертура, энергетический аксептанс и тушековское время жизни пучков, как в отсутствии ошибок юстировки элементов магнитной структуры и значений полей на замкнутой орбите, так и при их наличии, с учетом потерь на синхротронное излучение и квантового возбуждения. Выполнена адаптация кикер-магнитов для осуществления эффективной внеосевой инжекции.

**Ключевые слова:** источник синхротронного излучения четвертого поколения, эмиттанс пучка, кольцевой накопитель, магнитная структура, динамика электронов, аксептанс, инжекция

**DOI:** 10.56304/S2079562924050117

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Особая роль в развитии прикладных наук отведена источникам синхротронного излучения (СИ) и рентгеновским лазерам на свободных электронах (ЛСЭ). Специализация и программа исследований определяют основные требования и параметры к техническим характеристикам каждого конкретного источника СИ или ЛСЭ. Развитие современных технологий позволяет создавать специализированные синхротроны, предназначенные исключительно для генерации синхротронного излучения с использованием встраиваемых устройств, таких как ондуляторы и вигглеры. Такие специализированные кольцевые ускорители электронов получили название источников СИ 4-го поколения. Данные установки на сегодняшний день относятся к установкам класса “мегасайенс”. В настоящее время в нашем Отечестве, в соответствии с утвержденной Федеральной научно-технической программой развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы, на различных стадиях проектирования находятся три новых источника синхротронного излучения 4-го поколения “СКИФ” (Кольцово), “СИЛА” (Протвино), “РИФ” (о. Русский). Накопительный синхротрон “СИЛА”, создаваемый на базе НИЦ КИ, рассчитан на энергию электронов 6 ГэВ с равновес-

ным значением горизонтального эмиттанса около 70 пм·рад. Особенностью проекта “СИЛА” является объединение высокоэнергетического кольцевого источника синхротронного излучения четвертого поколения и рентгеновского лазера на свободных электронах в единый ускорительно-накопительный комплекс с общей исследовательской инфраструктурой. Синхротронный комплекс источника “СИЛА” разрабатывается для обеспечения генерации пучков СИ высокой яркости и когерентности, в широком диапазоне энергий рентгеновской области электромагнитного спектра. Для ондуляторного излучения будут доступны энергии фотонов от 5 до 200 кэВ при яркости  $10^{21}–10^{22}$  ф·с<sup>-1</sup>·мм<sup>-2</sup>·мрад<sup>-1</sup>, для излучения из поворотного магнита — от 0.1 до 150 кэВ при яркости до  $3 \cdot 10^{17}$  ф·с<sup>-1</sup>·мм<sup>-2</sup>·мрад<sup>-1</sup> и до 500 кэВ в режиме вигглерного излучения при яркости  $10^{18}–10^{19}$  ф·с<sup>-1</sup>·мм<sup>-2</sup>·мрад<sup>-1</sup>. Проектная пиковая яркость излучения лазера на свободных электронах —  $10^{33}$  ф·с<sup>-1</sup>·мм<sup>-2</sup>·мрад<sup>-1</sup> при длительности импульса до 200 фс или менее (в режиме “self-seeding”) [1].

Также, как и на большинстве аналогичных современных установок, инжекция электронных пучков в накопительный синхротрон будет производиться из линейного резонансного ускорителя при энергии эксперимента (top-up инжекция)

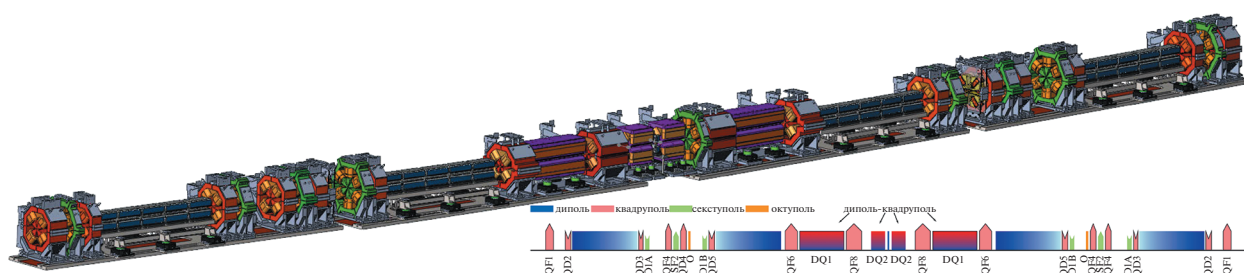


Рис. 1. Магнитная структура регулярного суперпериода накопителя “СИЛА”.

6 ГэВ, который будет выступать еще и как драйвер для лазера на свободных электронах.

Достоинствами данной конфигурации является высокая (95% и более) эффективность инжекции в накопительное кольцо и возможность получения пучка с заметно меньшим эмиттансом при инжекции по сравнению с бустерной схемой. Использование одного общего линейного ускорителя для накопительного синхротрона и рентгеновского лазера обеспечивает существенное сокращение стоимости и сроков выполнения проекта, позволяет интегрировать два современных источника фотонов с различными временными и яркостными характеристиками. Как известно, лазеры на свободных электронах обеспечивают рекордные параметры по пиковой яркости при сверхкороткой длительности рентгеновского импульса, в то время как для синхротронных источников характерна высокая средняя по времени яркость.

Таблица 1. Приведенные параметры оптических элементов

| Элемент | Абсолютные значения<br>относительного<br>изменения градиента, % |
|---------|-----------------------------------------------------------------|
| QF1     | 0.1                                                             |
| QD2     | 1.1                                                             |
| QD3     | 2.8                                                             |
| QF4     | 5.1                                                             |
| QD5     | 3.7                                                             |
| QF6     | 0.1                                                             |
| DQ1     | <0.1                                                            |
| QF8     | 0.1                                                             |
| DQ2     | <0.1                                                            |
| SD1AE   | 36                                                              |
| SF2     | 1.3                                                             |
| SD1BD   | 50                                                              |
| O       | <0.1                                                            |

## 2. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НАКОПИТЕЛЯ

В качестве инжектора будет использован линейный резонансный ускоритель с рабочей частотой 2.8 ГГц [2]. Для работы линейного ускорителя на накопительный синхротрон “СИЛА” необходимо, чтобы рабочая частота резонаторов ВЧ системы накопителя была кратна частоте ускорителя-инжектора, т.е. равной 350 МГц. Поскольку ранее проект накопителя был выполнен для частоты резонаторов 352.2 МГц [3], при выбранной кратности 1296 изменение рабочей частоты резонаторов накопителя влечет изменение величины его периметра на 6.934 м или 17.335 см в расчете на каждый из 40 суперпериодов (3D модель регулярно суперпериода представлена на рис. 1).

Изменение периметра накопителя требует перенастройки магнитной оптики (типа hybrid seven bend achromat, разработанной в ESRF, Франция) для обеспечения проектных параметров электронных сгустков источника СИ.

В результате перенастройки магнито-оптических элементов накопителя удалось восстановить проектные оптические функции (рис. 2), динамическую апертуру (ДА) и энергетический акцептанс накопителя (МА), а также увеличить время жизни пучков по Тушеку ( $\tau_T$ ). В табл. 1 представлены относительные изменения параметров магнитных элементов перенастроенной магнитной системы, а в табл. 2 — основные параметры масштабированного накопителя “СИЛА”. Произведенные изменения магнитных параметров оптических элементов не превышают предельно допустимых значений. Следует отметить, что наибольшие изменения претерпели градиенты секступольных линз SD1A, SD1E и SD1B, SD1D. Однако, изменения произведены “во встречном направлении” (SD1A, SD1E в сторону увеличения, а SD1B, SD1D в сторону уменьшения относительно исходных значений), так что секступоли можно просто поменять местами ввиду их конструктивной идентичности. В свою очередь это позволит избежать перепроектировки данных линз. Расчеты произведены с использованием программ AT [4] и elegant [5].

Горизонтальный размер динамической апертуры в точке инжекции в отсутствии ошибок и рабо-

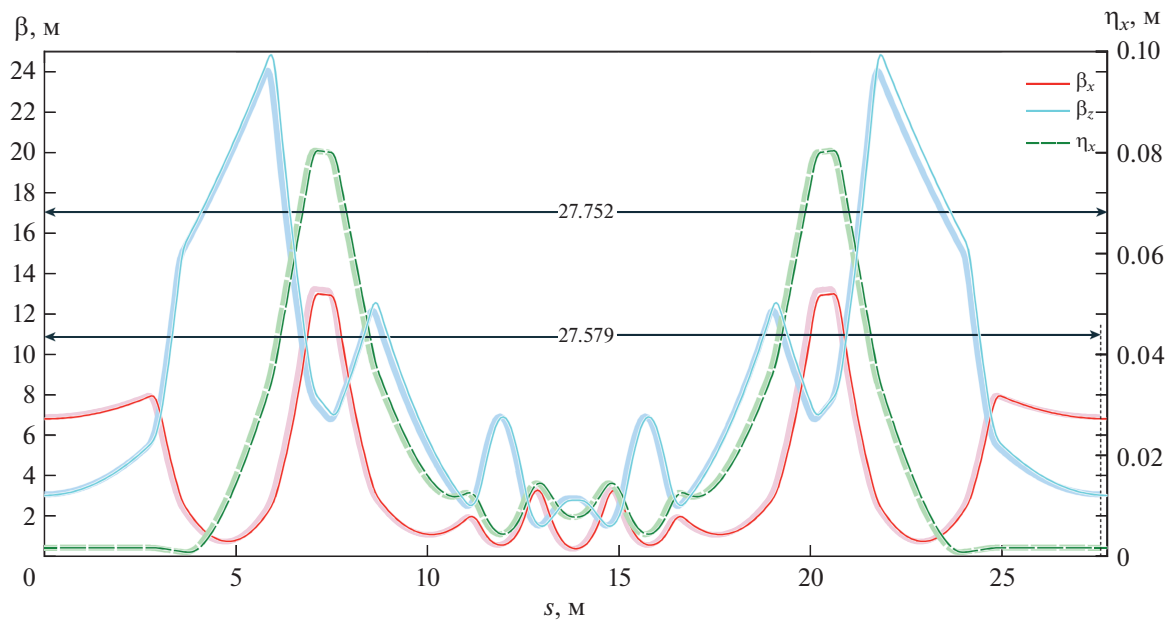


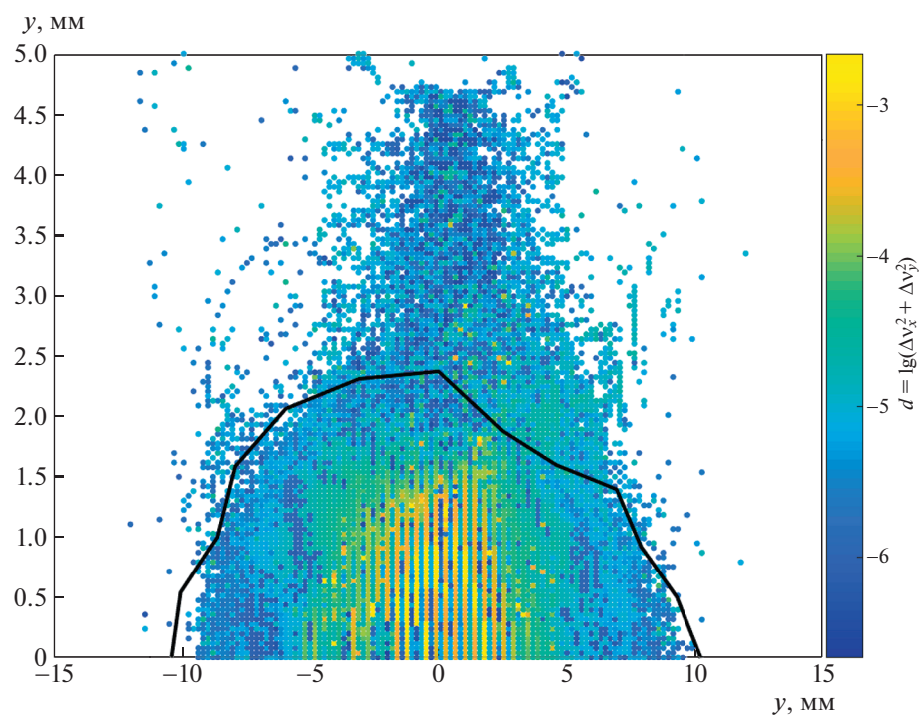
Рис. 2. Оптические функции регулярного периода накопителя для рабочих частот резонаторов 350 и 352.2 МГц.

тающих ВЧ резонаторах  $\pm 10$  мм, вертикальный – 2.5 мм (рис. 3). Для исследования изменения ДА при наличии ошибок (отклонения полей, градиентов и углового положения магнитных элементов от проектных значений), но без отклонения по импульсу частиц (on-momentum), использованы значения представленные в табл. 3 [6]. Средний размер ДА по 128 случайным наборам ошибок –  $\pm 7$  мм, вертикальный – 1.7 мм (см. рис. 4). На рис. 5 представлен результат расчета ДА в отсутствии ошибок, но при наличии отклонения по импульсу  $\delta = \Delta p/p_0$  от равновесного значения (off-momentum).

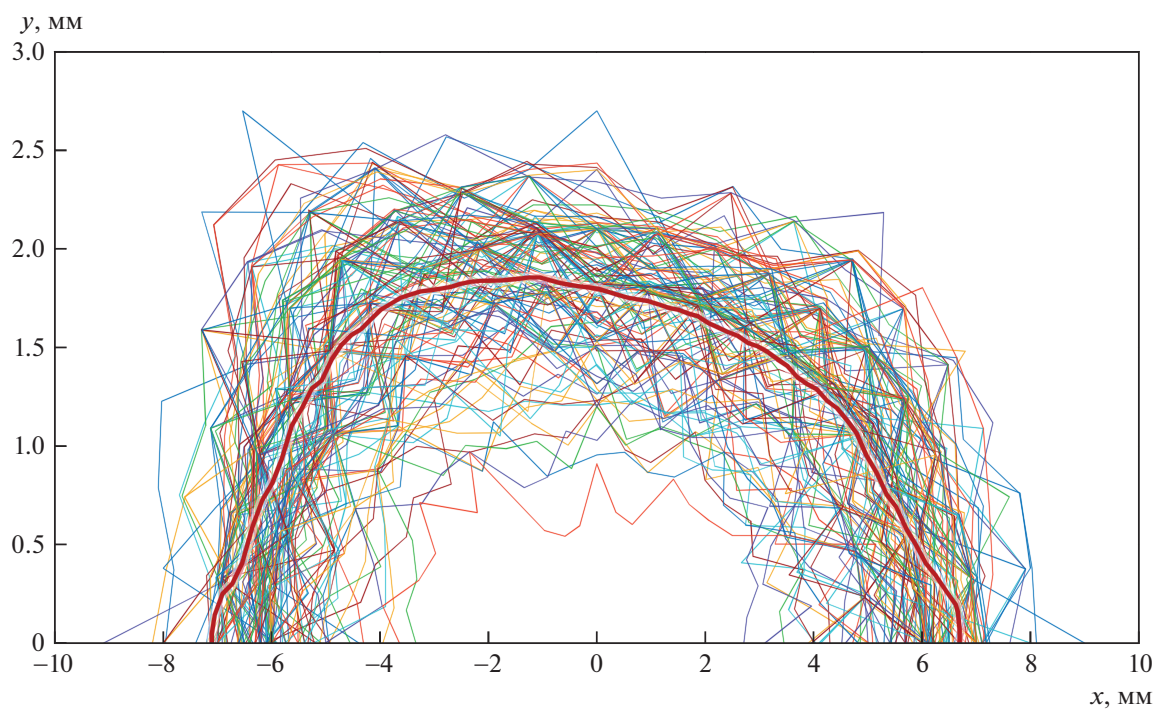
Отметим, что на трех из сорока прямолинейных участков (каждый длиной  $\sim 5$  м) предусмотрено размещение ВЧ резонаторов накопителя, предназначенных для компенсации потерь энергии электронов на СИ [7, 8]. Кроме того, в проекте “СИЛА” предусмотрены дополнительные резонаторы (3-й гармоники) для регулирования длины электронных пучков и подавления, в том числе, микроволновой неустойчивости. МА при различных значениях суммарного амплитудного напряжения на резонаторах накопителя для четырех последовательных суперпериодов представлен на рис. 6. На рис. 7 представлен результат

Таблица 2. Основные параметры масштабированного накопителя “СИЛА”

| Параметр                                                       | Значение             |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Периметр, м                                                    | 1110.1               |
| Число суперпериодов                                            | 40                   |
| Число каналов вывода фотонов                                   | 34 + 40              |
| Равновесный горизонтальный эмиттанс, пм·рад                    | 71.9                 |
| Относительный энергетический разброс, %                        | $8.51 \cdot 10^{-4}$ |
| Коэффициент пространственного расширения орбит                 | $5.72 \cdot 10^{-5}$ |
| Длина электронного сгустка при нулевом токе, мм                | 2.2                  |
| Приведенные бетатронные частоты (горизонт., вертикальн.)       | 95.21, 33.34         |
| Хроматичности (горизонт., вертикальн.)                         | 8, 6                 |
| Потери энергии электронным сгустком за один оборот, МэВ/оборот | 1.99                 |
| Суммарное амплитудное значение ВЧ напряжение резонаторов, МВ   | 8                    |
| Кратность                                                      | 1296                 |
| Максимальный накопленный ток, мА                               | 200                  |



**Рис. 3.** Динамическая апертура накопительного синхротрона “СИЛА” при учете диффузии бетатронных частот (цветом обозначена величина коэффициента диффузии частот  $d$ ).



**Рис. 4.** Динамическая апертура on-momentum при наличии ошибок.

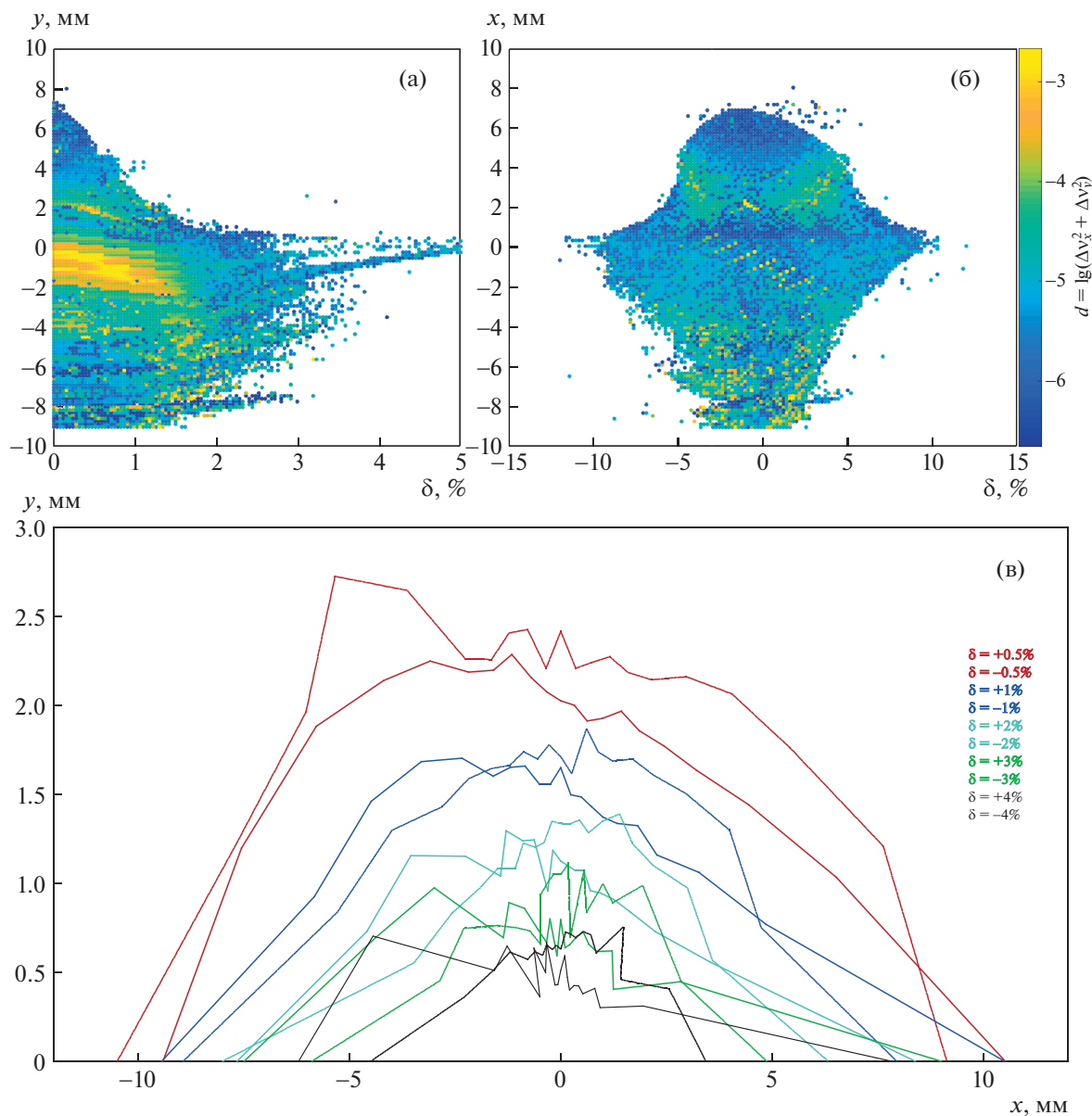


Рис. 5. Off-momentum динамическая апертура: (а) в плоскости  $(\delta, x)$ , (б) в плоскости  $(\delta, y)$ , (в) в плоскости  $(x, y)$ .

расчета локального МА на длине всего накопителя. Максимальное значение локального МА при суммарном амплитудном напряжении резонаторов накопителя 8 МВ составляет  $\pm 6.5\%$ , минимальное –  $3.8\%$ .

На рис. 8 представлено изменение приведенных бетатронных частот от относительного отклонения импульса сгустка от равновесного значения. Из рисунков видно, что требуется дополнительная настройка мультипольных линз для увеличения диапазона допустимых отклонений импульса сгустка от равновесного значения  $\delta$ .

Время жизни в накопителе определяется однократным эффектом Тушека [9]. Данный параметр

определяет время циркуляции сгустка заряженных частиц в накопителе в течение, которого занимаемый им фазовый объем имеет допустимое значение. На рис. 9 представлена зависимость времени жизни электронного сгустка по Тушеку в

**Таблица 3.** Ошибки, использованные при расчетах

| Ошибка                             | Допуск                  |
|------------------------------------|-------------------------|
| Поворотные магниты $\Delta B/B$    | $10^{-3}$               |
| Поворотные магниты $\Delta\theta$  | $3 \cdot 10^{-4}$ рад   |
| Квадрупольные линзы $\Delta G/G$   | $0.5 \cdot 10^{-3}$     |
| Квадрупольные линзы $\Delta\theta$ | $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад |



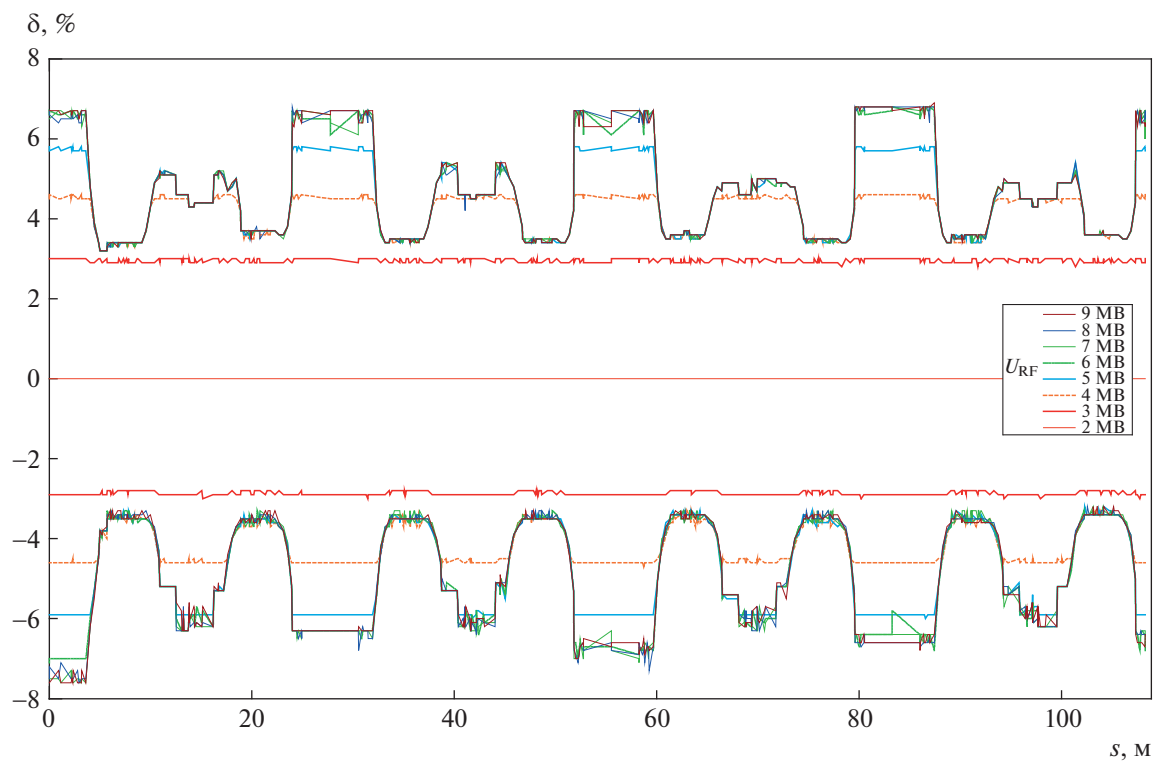


Рис. 6. Локальный энергетический аксептанс для различных значений амплитуды напряжения на резонаторах.

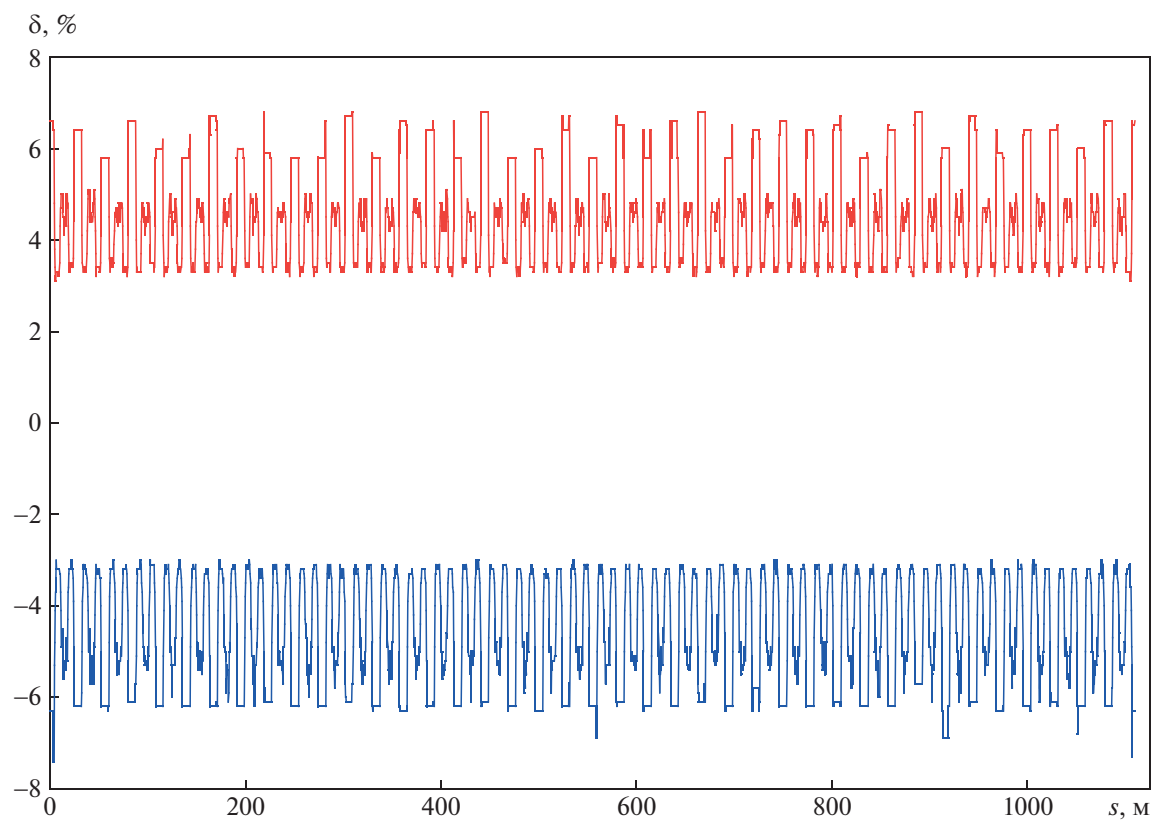


Рис. 7. Локальный энергетический аксептанс накопителя “СИЛА”.

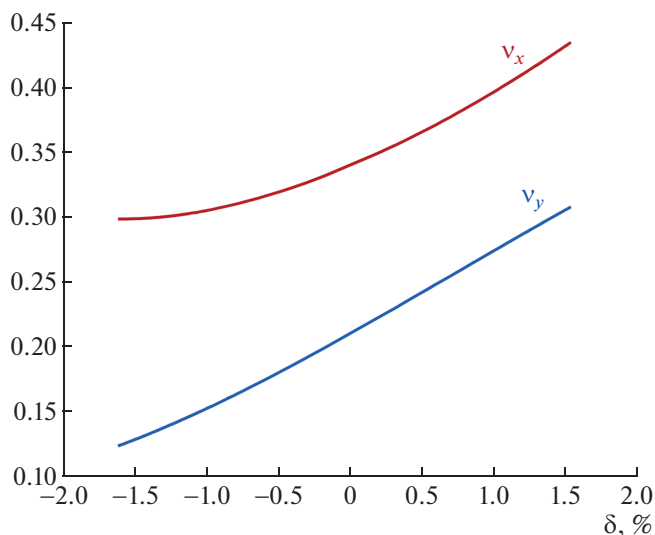


Рис. 8. Зависимость приведенных бетатронных частот от отклонения импульса сгустка от равновесного значения.

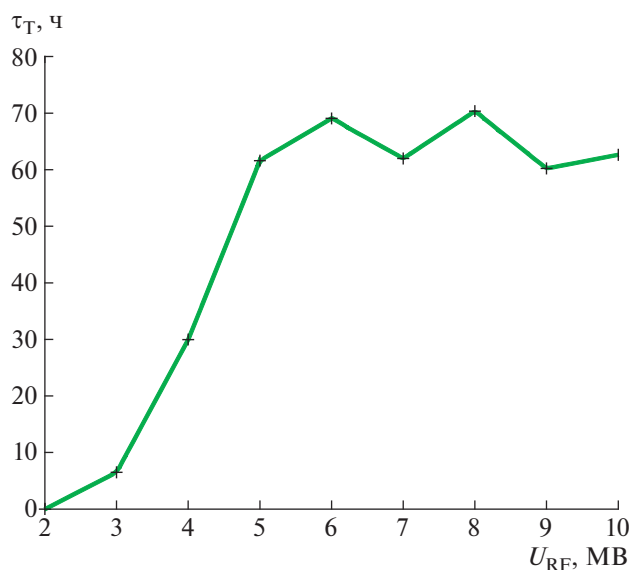


Рис. 9. Время жизни электронного сгустка по Тушеку как функция напряжения на ВЧ резонаторах.

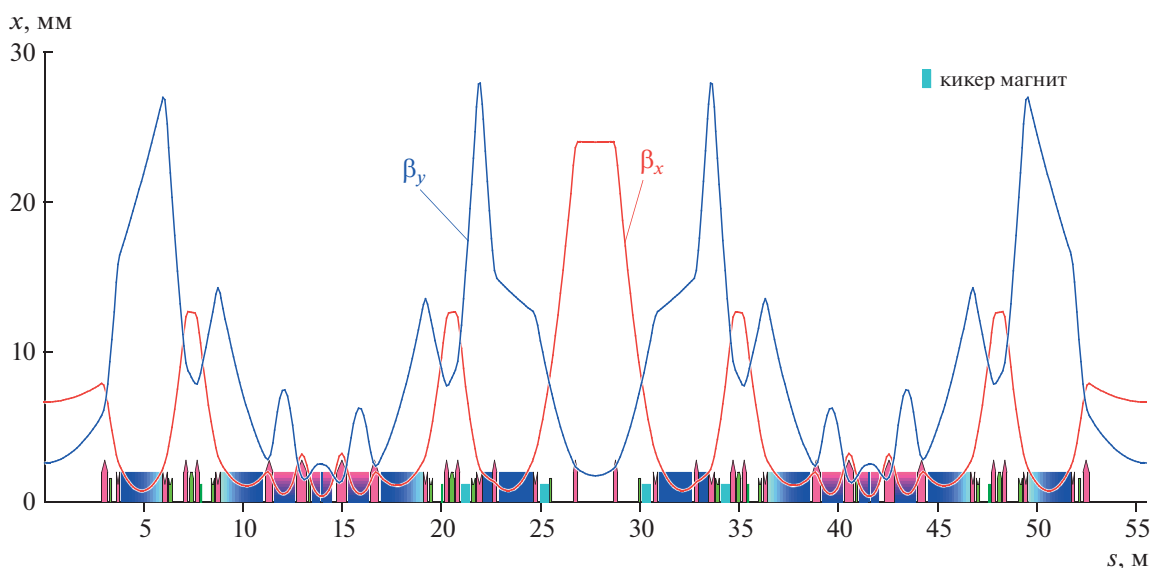


Рис. 10. Оптические функции инжекционных периодов.

зависимости от величины суммарного амплитудного напряжения на резонаторах накопителя. Рассчитанное значение  $\tau_T$  в режиме равномерного заполнения накопителя 1296 электронными сгустками с зарядом 0.43 нКл и длиной 2.2 мм при суммарном амплитудном напряжении на резонаторах накопителя 8 МВ составляет чуть более 70 ч.

Два периода накопителя имеют измененную по отношению к остальным 38 периодам магнитную структуру предназначенную для осуществления ставшей классической вне осевой инжекции с использованием четырех кикер-магнитов (т.н.

$\pi$ -bump). Восстановленные после перехода на новую частоту резонаторов оптические функции на длине двух инжекционных периодов представлены на рис. 11, а на рис. 12 представлен  $\pi$ -bump высотой порядка 15 мм, которая является достаточной для эффективной top-up инжекции частиц из линейного ускорителя.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с изменением рабочей частоты ВЧ резонаторов накопительного синхротрона “СИЛА”

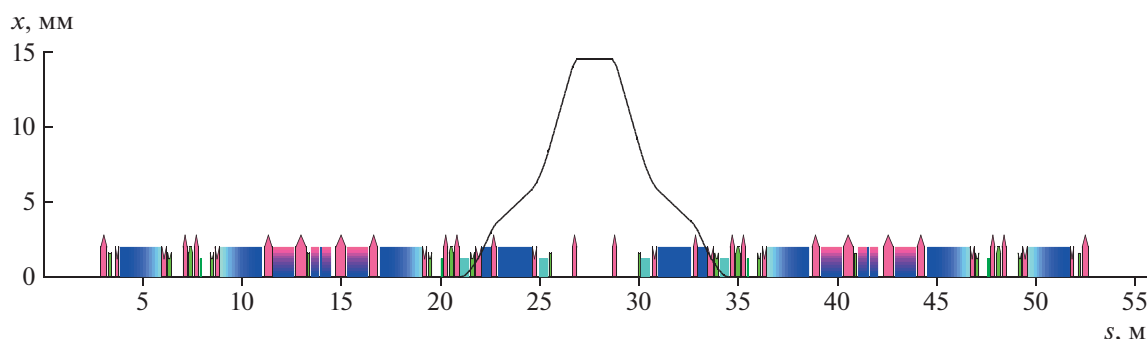


Рис. 11. Инжекционный  $\pi$ -bump, сформированный системой четырех кикер-магнитов.

на энергию 6 ГэВ четвертого поколения выполнено масштабирование его магнитной структуры типа НМВА. Параметры оптических элементов накопительного синхротрона обеспечивают проектные параметры электронных сгустков, в частности, достижение значения равновесного горизонтального эмиттansa равного 72 пм. Динамическая апертура для равновесного значения импульса электронов 6 ГэВ/с составляет  $\pm 10$  мм. Максимальное значение локального энергетического аксептansa при суммарном амплитудном напряжении резонаторов накопителя 8 МВ составляет  $\pm 6.5\%$ . Время жизни электронного пучка в режиме равномерного заполнения накопителя 1296 сгустками длиной 2.2 мм с зарядом 0.43 нКл каждый и при суммарном амплитудном напряжении на резонаторах накопителя 8 МВ составляет примерно 70 ч. Кикер-магниты инжекционного промежутка адаптированы для осуществления эффективной внеосевой top-up инъекции.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”, <http://ckp.nrcki.ru/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Ковальчук М.В. и др. // Кристаллография. 2022. Т. 67 (5). С. 726–734.
2. Polozov S.M., // Proc. 72nd Int. Conf. NUCLEUS-22. July 11–16, 2022. Moscow, Russia, P. 344.
3. Liuzzo S.M. et al. // Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. IPAC'21. May 2021. Brazil. pp. TUPAB049.
4. Rogers W. et al. // Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. IPAC'17. May 2017. Copenhagen, Denmark. P. 3855–3857. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-THPAB060>
5. Borland M. // Proc. Int. Conf. Atomic Physics ICAP. June 2000. Florence, Italy. LS-287. P. 11. <https://doi.org/10.2172/761286>
6. EBS Storage Ring Technical Report. <https://www.esrf.fr>.
7. Lalayan M.V. et al. // Proc. RuPAC'21. Sept. 2021. Alushta, Russia. P. 367–369. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEP-SC13>
8. Самароков Н.Ю., Шашков Я.В., Лалаян М.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (1). С. 37–42. <https://doi.org/10.56304/S2079562922010328> [Samarokov N.Yu., Shashkov Ya.V., Lalayan M.V. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (11). P. 1856–1861. <https://doi.org/10.1134/S106377882110032X>].
9. Touschek B. et al. // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 10. P. 411–416. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.407>

## Scaling of the SYLA Synchrotron Lattice

V. S. Dyubkov<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>2</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123098 Russia

\*e-mail: vsdyubkov@mephi.ru

Received June 19, 2023; revised June 26, 2023; accepted July 3, 2023

**Abstract**—The lattice of the fourth-generation of the SYLA electron storage synchrotron of 6 GeV is scaled using the resources of the National Research Center Kurchatov Institute. Parameters of the storage synchrotron that provide design parameters of electron beams in the accumulator have been calculated. The dynamic



aperture, momentum acceptance, and Touschek lifetime of the beams were determined, both in the case of no errors in the adjustment of magnetic structure elements and field values in a closed orbit and in their presence, taking into account losses due to synchrotron radiation and quantum excitation. Kicker magnets have been adapted to provide efficient off-axis injection.

*Keywords:* fourth generation synchrotron radiation source, beam emittance, storage ring, magnetic lattice, electron dynamics, acceptance, injection