

Научная статья

УДК 531.8

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53

Статус магнитных элементов инжектора СКИФ*

Вадим Александрович Павлюченко^{1,2}, Данила Алексеевич Никифоров^{1,3}
Александр Анатольевич Старостенко^{1,2}, Константин Владимирович Жилиев¹
Андрей Михайлович Молокоедов¹, Алексей Юрьевич Пахомов¹
Егор Александрович Субаев¹, Дмитрий Игоревич Чекменёв¹
Владимир Георгиевич Ческидов¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия

³Центр коллективного пользования СКИФ
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН
Новосибирск, Россия

V.A.Pavlyuchenko@inp.nsk.su
D.A.Nikiforov@inp.nsk.su
A.A.Starostenko@inp.nsk.su
K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su
A.M.Molokoedov@inp.nsk.su
A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su
E.A.Subaev@inp.nsk.su
D.I.Chekmenyov@inp.nsk.su
V.G.Tchekidov@inp.nsk.su

Аннотация

В статье описана магнитная система инжектора для источника СИ «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ). Представлены результаты моделирования квадрупольных и соленоидальных линз, а также дипольных корректоров для инжектора на основе линейного ускорителя. Данные элементы должны обеспечить возможность транспортировки электронного пучка на протяжении всего ускорителя без потерь. Продемонстрированы результаты измерений всех произведенных магнитных элементов. В настоящий момент все описанные элементы штатно работают на стенде линейного ускорителя.

Ключевые слова

магнитные элементы, линейные ускорители, магнитные линзы

Благодарности

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0041).

Для цитирования

Павлюченко В. А., Никифоров Д. А., Старостенко А. А., Жилиев К. В., Молокоедов А. М., Пахомов А. Ю., Субаев Е. А., Чекменёв Д. М., Ческидов В. Г. Статус магнитных элементов инжектора СКИФ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 43–53. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Павлюченко В. А., Никифоров Д. А., Старостенко А. А., Жилиев К. В., Молокоедов А. М., Пахомов А. Ю., Субаев Е. А., Чекменёв Д. М., Ческидов В. Г., 2024

Status of Magnetic Elements of the SKIF Injector

Vadim A. Pavliuchenko^{1,2}, Danila A. Nikiforov^{1,3}, Alexander A. Starostenko^{1,2}
Konstantin V. Zhilyaev¹, Andrey M. Molokoedov¹, Alexey Yu. Pakhomov¹
Egor A. Subaev¹, Dmitri I. Chekmenev, Vladimir G. Cheskidov¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation

³Center for Collective Use Siberian Circular Photon Source of the Center Institute
of Catalysis named after G. K. Boreskov of SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

V.A.Pavliuchenko@inp.nsk.su

D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

A.A.Starostenko@inp.nsk.su

K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su

A.M.Molokoedov@inp.nsk.su

A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

E.A.Subaev@inp.nsk.su

D.I.Chekmenyov@inp.nsk.su

V.G.Tcheskidov@inp.nsk.su

Abstract

The paper describes the magnetic injector system for the SRF “Siberian Circular Photon Source” (SKIF). The results of modeling quadrupole and solenoid lenses, as well as dipole correctors for an injector based on a linear accelerator are presented. These elements should make it possible to transport the electron beam throughout the accelerator without loss. The results of measurements of all produced magnetic elements are demonstrated. The described elements are working normally at the linear accelerator stand.

Keywords

magnetic elements, linear accelerators, magnetic lenses

Funding

The work was partially carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the Institute of Catalysis SB RAS.

For citation

Pavliuchenko V. A., Nikiforov D. A., Starostenko A. A., Zhilyaev K. V., Molokoedov A. M., Pakhomov A. Yu., Subaev E. A., Chekmenev D. I., Cheskidov V. G.. Status of magnetic elements of the SKIF injector. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 43–53 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53

Введение

На сегодняшний день в мире успешно работает более 50 источников синхротронного излучения (СИ), которые постоянно модернизируются и обновляются. СКИФ – источник СИ четвертого поколения – будет иметь эмиттанс менее 100 пм·рад при энергии 3 ГэВ [1]. Одним из ключевых элементов будущего источника СИ является линейный ускоритель, который генерирует и ускоряет пучок электронов до максимальной энергии 200 МэВ. Именно в линейном ускорителе формируется качество пучка (поперечный эмиттанс и энергетический разброс). Одной из ключевых систем линейного ускорителя является система фокусировки пучка и коррекции его орбиты. Система фокусировки пучка должна быть рассчитана и спроектирована таким образом, чтобы обеспечить сохранение качества пучка в процессе его транспортировки и ускорения. В данной статье описаны магнитные элементы, разработанные для линейного ускорителя СКИФ, а также приведены результаты измерений их основных параметров.

1. Описание первой очереди линейного ускорителя СКИФ

С точки зрения фокусировки пучка линейный ускоритель разделен на две части. В первой части ускорителя фокусировка пучка осуществляется аксиально-симметричными магнитными линзами, во второй части – квадрупольными линзами. Для согласования огибающей пучка между частью ускорителя с аксиально-симметричными линзами и частью, где применяется квадрупольная фокусировка, используется дублет квадрупольных линз (см. рис. 1, б). Для коррекции орбиты пучка во всем ускорителе используются два типа дипольных корректоров («рамочные» и «М-образные»).

На рис. 1 представлена схема линейного ускорителя до второй регулярной ускоряющей структуры (УС) с обозначением магнитных элементов.

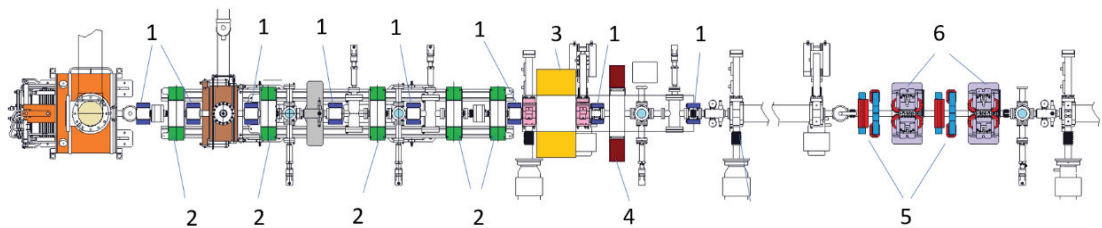


Рис. 1. Схема инжектора СКИФ: 1 – «рамочный» корректор; 2 – соленоид секции группировки; 3 – соленоид предускорителя; 4 – согласующий соленоид; 5 – «М-образный» корректор; 6 – квадрупольная линза
Fig. 1. Scheme of the SKIF injector: 1 – “O-shape” corrector; 2 – solenoid of the grouping section; 3 – solenoid of the pre-accelerator; 4 – matching solenoid; 5 – “M-shape” corrector; 6 – quadrupole lens

Параметры линака СКИФ

Таблица 1

Table 1

Parameters of the SKIF linac

Параметр	Значение
Номинальная энергия электронов (МэВ)	200
Частота повторений импульсов (Гц)	1
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ (нм·рад)	150
Разброс по энергии на 200 МэВ (%)	1

После СВЧ-пушки происходит группировка пучка с помощью субгармонического группирователя с частотой 535,5 МГц. Регулярные УС линейного ускорителя предназначены для работы с релятивистским пучком. Такой пучок формируется в предускорителе-группирователе (ПГ) на основной частоте 2,856 ГГц, который служит для окончательной группировки и ускорения пучка до энергии около 3 МэВ. Для фокусировки пучка в промежутке между СВЧ-пушкой и ПГ используются пять однотипных соленоидальных линз 2. Поскольку в процессе группировки внутри ПГ пучок испытывает сильную дефокусировку, секция ПГ помещена в сильный бронированный соленоид 3. Кроме того, из-за группирующей фазы электрического поля в структуре ПГ пучок на ее выходе является расходящимся. Для его фокусировки и инжекции в первую регулярную УС установлен дополнительный согласующий соленоид 5. После первой УС пучок имеет энергию около 35 МэВ, а для его фокусировки используются квадрупольные линзы 6. В табл. 1 представлены основные параметры линейного ускорителя [2].

2. Магнитная система линейного ускорителя

2.1. Дипольные корректоры

В промежутке между СВЧ-пушкой и первой регулярной УС пучок имеет сравнительно небольшую энергию (от 0,8 до 3 МэВ). В этом случае даже незначительные ошибки в выставке магнитных элементов (аксиально-симметричные линзы) могут приводить к серьезным отклонениям пучка от центра вакуумной камеры, кроме того, величины магнитного поля земли может быть достаточно, чтобы пучок попал на стенку вакуумной камеры. Было проведено моделирование динамики пучка с учетом разумных ошибок выставки магнитных элементов. Магнитное поле земли моделировалось введением однородного вертикального магнитного поля с индукцией 45 мкТл на участке от катода до входа в первую УС. На основании моделирования были сформулированы требования на интеграл дипольного поля рамочных корректоров для описанного промежутка. Ярмо каждого корректора представляет собой прямоугольную раму. На каждой стороне рамы намотаны катушки с переменным шагом, что улучшает качество поля. Такое решение позволяет в разы улучшить качество поля (однородность в зазоре изменяется от $\sim 1,2 \cdot 10^{-2}$ до $\sim 4,0 \cdot 10^{-3}$). Выбранная конструкция обеспечивает требуемое качество.

С помощью программной среды OPERA 3D¹ была смоделирована работа корректора в дипольном режиме при постоянном токе.

Для той части линейного ускорителя, в которой пучок ускоряется от 40 МэВ до 200 МэВ, были разработаны корректоры другого типа с М-образным ярмом. Такие корректоры должны обеспечивать интеграл магнитного поля более 4 Тл·мм. На прямых участках рамы намотаны катушки. Для обеспечения коррекции по двум координатам два таких электромагнита устанавливаются друг за другом, повернутые на 90° относительно друг друга по оси пролета пучка. Такая конструкция позволяет, имея не большой зазор между полюсами, обеспечить достаточное качество поля. Для оптимизации качества поля были подобраны шимы. На рис. 2 представлены изображения модели корректоров и готовые корректоры. В табл. 2 приведены расчетные параметры корректоров.

Таблица 2

Параметры корректоров

Table 2

Correctors parameters

Тип корректора	Рамочный	М-образный
Ток максимальный (А)	3	3,75
Максимальная индукция магнитного поля в центре корректора (Гс)	20,4	495
Максимальный интеграл магнитного поля (Тл·мм)	0,29	4,69
Однородность интеграла магнитного поля в области радиусом 10 мм $\Delta B/B$	$< 5,0 \cdot 10^{-3}$	

Представленные дипольные корректоры были изготовлены на производстве ИЯФ СО РАН и в настоящее время установлены на стенд линейного ускорителя. После изготовления элементов были проведены магнитные измерения с помощью «каретки» с датчиками Холла. Измерения показали, что магнитное поле в центре «рамочных» корректоров при токе 3 А составляет от 20,2 до 20,8 Гс. Эффективная длина корректора составила от 143,2 до 143,8 мм. Измеренная

¹ OPERA – electromagnetic and electromechanical simulation. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/opera>

интегральная однородность поля ($\Delta[B]/B$) на радиусе 10 мм: от 0,27 до 0,6 %. Магнитное поле в центре «М-образного» корректора при токе 3,75 А составляет от 496 до 499 Гс, эффективная длина в диапазоне от 94,4 до 94,7 мм, а интегральная однородность магнитного поля ($\Delta[B]/B$) не превысила 0,5 %. На рис. 3 изображены графики измеренной однородности магнитного поля в зазоре корректоров, а на рис. 4 представлены расчетные и измеренные поля на оси корректоров.

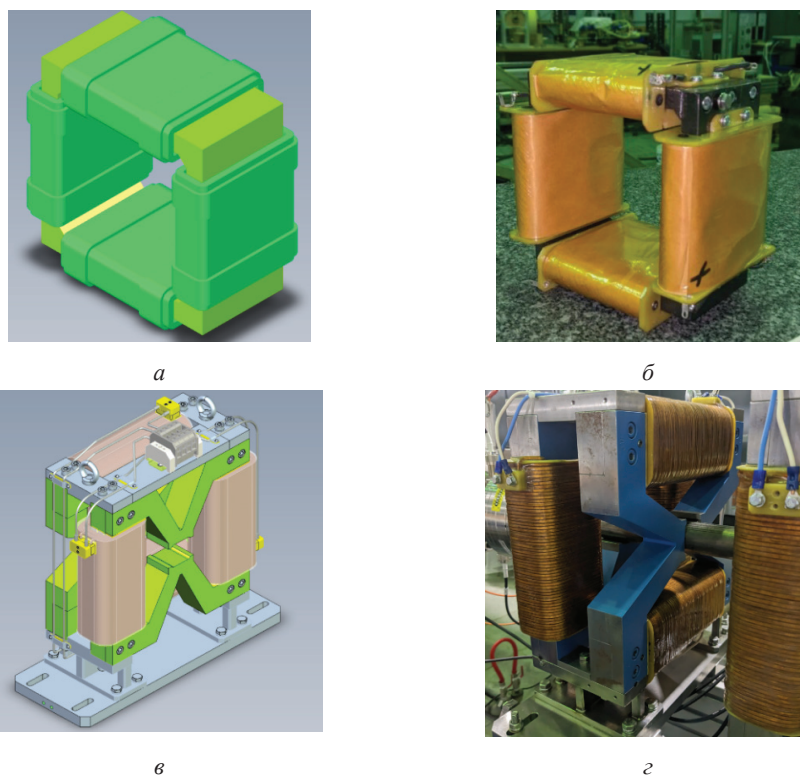


Рис. 2. Модели корректоров: а – трехмерная модель «рамочного» корректора; б – изготовленный рамочный корректор; в – трехмерная модель «М-образного» корректора; г – изготовленный «М-образный» корректор
Fig. 2. Corrector models: а – 3D model of “O-shape” corrector; б – manufactured “O-shape” corrector; в – 3D model of “M-shape” corrector; г – manufactured “M-shape” corrector

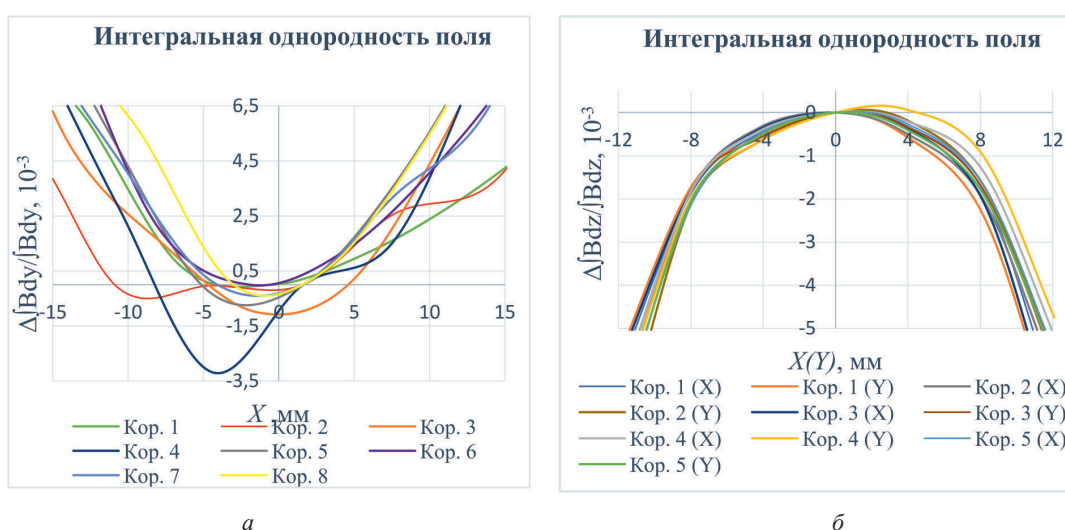


Рис. 3. Однородность поля: а – в «рамочных» корректорах; б – в «М-образных» корректорах
Fig. 3. Field homogeneity: а – in “O-shape” correctors; б – in “M-shape” correctors

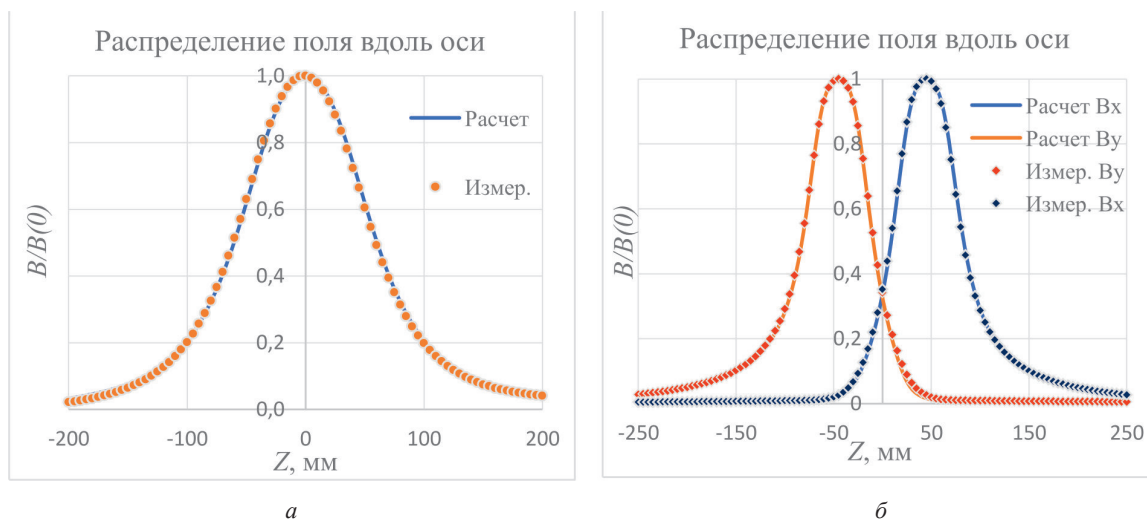


Рис. 4. Распределение поля вдоль оси: *a* – в «рамочных» корректорах (расчетное и измеренное); *б* – в «М-образных» корректорах (расчетное и измеренное)
 Fig. 4. Field distribution along the axis: *a* – in “O-shape” correctors (calculated and measured); *б* – in «M-shape» correctors (calculated and measured)

2.2. Соленоиды секции группировки

Линзы секции группировки предназначены для фокусировки пучка в промежутке от ВЧ-пушки до ПГ. Ярмо линзы выполнено из стали 10. Состоит из двух торцевых пластин, выполненных в форме шестиугольника и шести пластин, соединяющих торцевые для замыкания магнитного ярма. Выбранная форма брони линзы в виде многогранника существенно упрощает процесс изготовления линзы, при этом не нарушая симметрии поля на всей апертуре вакуумной камеры. Внутри ярма располагается соленоидальная катушка. На рис. 5 представлено изображение такого соленоида, а в табл. 3 приведены его параметры.



Рис. 5. Соленоид соленоида секции группировки: *a* – модель соленоида секции группировки; *б* – изготовленная линза

Fig. 5. Model of the solenoid of the grouping section (*a*); manufactured lens (*б*)

Таблица 3

Параметры соленоидов секции группировки

Table 3

Parameters of the solenoids of the grouping section

Параметр	Значение
Апертура (мм)	38
Габаритные размеры линзы (мм)	$342 \times 342 \times 100$
Максимальный ток (А)	6
Магнитное поле в центре линзы при токе 6 А (Гс)	839

Для всех линз были проведены магнитные измерения распределения фокусирующего поля на оси. Магнитное поле в линзах при токе 6 А находится в пределах от 858 до 870 Гс. На рис. 6 представлен сравнительный график рассчитанного и измеренного распределения магнитного поля на оси линзы.

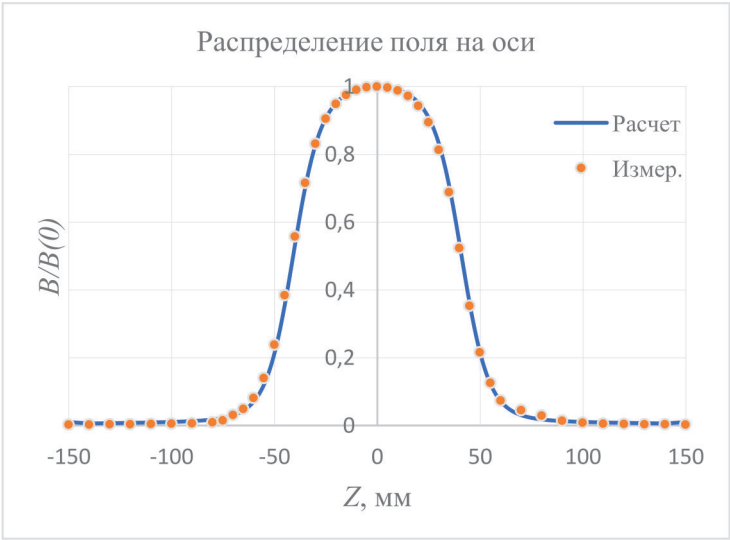


Рис. 6. Измеренное и рассчитанное распределение поля вдоль оси соленоида секции группировки
Fig. 6. The measured and calculated field distribution along the axis of the solenoid of the grouping section

2.3. Соленоид предускорителя

Другим типом соленоида, используемого на ускорителе, является соленоид, внутрь которого помещен ПГ. Его особенностью является то, что он состоит из двух независимых обмоток. Такое решение позволяет варьировать распределение магнитного поля вдоль оси соленоида, что может позволить обеспечить более гибкую настройку пучка в ускорителе. На рис. 7 изображена модель соленоида предускорителя с гирдером и креплением, а в табл. 4 приведены его параметры.

Для случая, когда обе катушки запитаны на максимальный ток, дана оценка поперечных полей на оси пучка, связанных с наличием отверстий под выводы проводов в броне и наличием в гирдере материалов с магнитной проницаемостью, отличной от единицы. Из-за отсутствия симметрии, вызванной наличием отверстий под выводы, в магните появились поперечные компоненты поля на оси линзы. Добавлением симметричных отверстий в стальной броне уда-

лось скомпенсировать поперечные компоненты поля. На рис. 8 представлены распределения поперечных полей на оси линзы до и после симметризации.

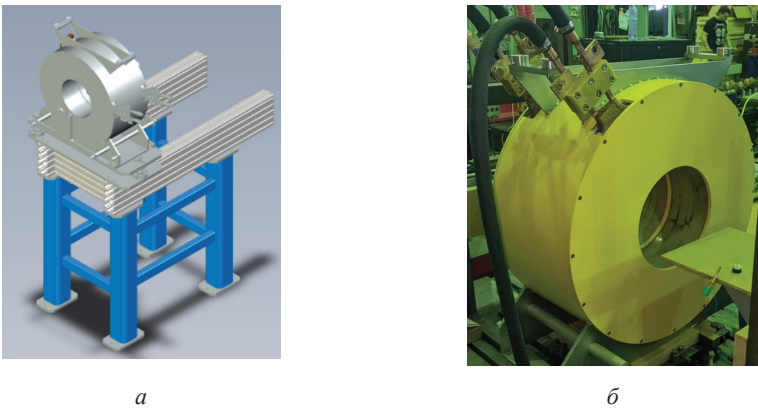


Рис. 7. Соленоид предускорителя:
а – модель соленоида предускорителя; б – изготовленный соленоид предускорителя
Fig. 7. Model of the pre-accelerator solenoid (a); Manufactured pre-accelerator solenoid (b)



Рис. 8. Поперечное поле на оси соленоида предускорителя до добавления симметричных отверстий и после
Fig. 8. Transverse field on the axis of the pre-accelerator solenoid before the addition of symmetrical holes and after

Таблица 4

Параметры соленоида предускорителя

Table 4

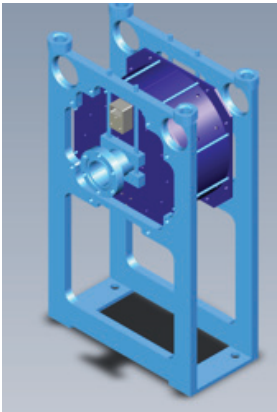
Parameters of the pre-accelerator solenoid

Параметр	Значение
Апертура (мм)	225
Габаритные размеры линзы (мм)	555 × 555 × 260
Ток максимальный (А)	200
Магнитное поле в центре линзы при включении двух соленоидов (Тл)	0,23
Эффективная длина линзы (мм)	330

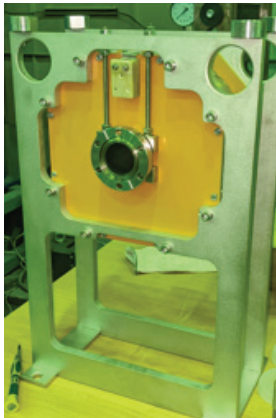
После изготовления данные соленоиды были измерены с помощью датчиков холла. При токе 200 А в обоих соленоидах магнитное поле достигает 0,25 Тл.

2.4. *Согласующий соленоид*

Согласующий соленоид служит для фокусировки и согласования размера пучка при инжекции в первую регулярную УС и должен иметь поле в центре порядка 0,1 Тл при эффективной длине примерно 90 мм. Ярмо линзы состоит из двух торцевых пластин и четырех арок круглой формы, собранных поверх соленоидальной катушки. На рис. 9 представлена модель соленоида после проработки конструктором, а в табл. 5 указаны его параметры.



а



б

Рис. 9. Модель соленоида после проработки конструктором:
а – модель согласующего соленоида; б – изготовленный соленоид
Fig. 9. Model of the matching solenoid (а); Manufactured solenoid (б)

Таблица 5

Параметры согласующего соленоида

Table 5

Parameters of the matching solenoid

Параметр	Значение
Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	190 × 190 × 100
Ток максимальный (А)	3
Максимальное магнитное поле в центре линзы (Тл)	0,1
Эффективная длина линзы (мм)	92

2.5. *Квадрупольные линзы*

В табл. 6 представлены расчетные параметры линз. Ярмо линз изготовлено из стали 10. Для уменьшения интегральных высших гармоник, разрешенных симметрией, была проведена работа по подбору формы шимов на полюсе линзы. Также для подавления шестой гармоники была выбрана фаска на полюсах размером 4,00 × 3,95 мм. На рис. 10 показана трехмерная модель линзы и готовая линза.

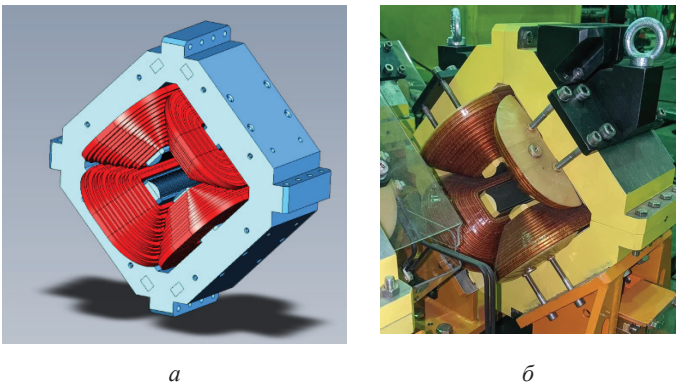


Рис. 10. Квадрупольная линза:
a – модель квадрупольной линзы; *б* – изготовленный элемент
Fig. 10. Model of a quadrupole lens (a); manufactured element (б)

Таблица 6

Расчетные параметры квадрупольных линз линака СКИФ

Table 6

Calculated parameters of linac SKIF quadrupole lenses	
Параметр	Значение
Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	310 × 310 × 200
Ток максимальный (А)	6
Интеграл градиент в центре линзы при токе 6 А (Тл)	0,62
Нормированная на основную шестая нормальная интегральная гармоника (B_6/B_2) на радиусе 15 мм	$< 5,0 \cdot 10^{-4}$
Нормированная на основную десятая нормальная интегральная гармоника (B_{10}/B_2) на радиусе 15 мм	$< 5,0 \cdot 10^{-4}$

В настоящее время квадрупольные линзы установлены на стенд линейного ускорителя. После изготовления элементов были проведены магнитные измерения с использованием вала с вращающейся катушкой. Измерения показали, что интеграл магнитного поля при токе 6 А составляет от 0,608 до 0,611 Тл. А интегральные гармоники для B_6/B_2 не превышают $3,67 \cdot 10^{-4}$, а для B_{10}/B_2 достигают $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Заключение

В работе были представлены результаты моделирования и измерения магнитных элементов линейного ускорителя СКИФ. Все созданные магнитные элементы удовлетворяют требованиям и были испытаны на стенде линейного ускорителя, обеспечив полное токопрохождение пучка электронов.

Список литературы

1. **Гуров С. М. и др.** Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 7. С. 3–7.
2. **Andrianov A. et al.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // *Journal of Instrumentation*. 2022. Vol. 17, №. 02. P. T02009.

References

1. **Gurov S. et al.** Injection system for Siberian circle photon source. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2020, no. 7, pp. 3–7. (in Russ.)
2. **Andrianov A. et al.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // *Journal of Instrumentation*, 2022, vol. 17, no. 02, pp. T02009.

Сведения об авторах

Павлюченко Вадим Александрович, младший научный сотрудник

Никифоров Данила Алексеевич, научный сотрудник

Старостенко Александр Анатольевич, заведующий сектором

Жилияев Константин Владимирович, младший научный сотрудник

Молокоедов Андрей Михайлович, ведущий инженер-конструктор

Пахомов Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник

Субаев Егор Александрович, инженер-исследователь

Чекменёв Дмитрий Игоревич, инженер-конструктор 1-й категории

Владимир Георгиевич Ческидов, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Vadim A. Pavlyuchenko, Junior Researcher

Danila A. Nikiforov, Researcher

Alexander A. Starostenko, Head of the Sector

Konstantin V. Zhilyaev, Junior Researcher

Andrey M. Molokoyedov, Lead Design Engineer

Alexey Y. Pakhomov, Junior Researcher

Egor A. Subaev, Researcher-Engineer

Dmitri I. Chekmenev, Design Engineer

Vladimir G. Cheskidov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 14.09.2023;
одобрена после рецензирования 10.01.2024; принята к публикации 21.01.2024*

*The article was submitted 14.09.2023;
approved after reviewing 10.01.2024; accepted for publication 21.01.2024*