

Научная статья

УДК 537.533.7

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27

Измерение параметров ВЧ-пушки линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника фотонов

Сяочао Ма¹, Мария Васильевна Арсентьева², Александр Матвеевич Батраков³,
Алексей Евгеньевич Левичев⁴, Владимир Николаевич Волков⁵,
Олег Игоревич Мешков⁶, Юлия Игоревна Мальцева⁷, Данила Алексеевич Никифоров⁸,
Антон Владимирович Павленко⁹, Куаньцзюнь Фань¹⁰

¹⁻⁹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

^{2,6}Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

⁷Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

¹⁰Хуачжунский университет науки и техники
Ухань, Китай

^{2,8}ЦКП «СКИФ»
р. п. Кольцово, Россия

¹maxiaochao199212@icloud.com, ²M.V.Arsentyeva@inp.nsk.su

³A.M.Batnikov@inp.nsk.su, ⁴V.N.Volkov@inp.nsk.su

⁵A.E.Levichev@inp.nsk.su, ⁶Yu.I.Maltseva@inp.nsk.su

⁷O.I.Meshkov@inp.nsk.su, ⁸D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

⁹A.V.Pavlenko@inp.nsk.su, ¹⁰kjfan@hust.edu.cn

Аннотация

В работе анализируются результаты первых экспериментов по получению проектных параметров пучка ВЧ-пушки линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника синхротронного излучения (СКИФ) и описываются методы диагностики, использованные при этом. Исследованными параметрами являлись поперечный и продольный профили пучка, его эмиттанс, энергия и энергетический разброс, ток, заряд и потери частиц. Проводится сравнение полученных величин с данными численного моделирования.

Ключевые слова

СКИФ, ВЧ-пушка, люминофорный датчик, магнитный спектрометр, стрип-камера, черенковское излучение, цилиндр Фарадея

Для цитирования

Ма С., Арсентьева М. В., Батраков А. М., Левичев А. Е., Волков В. Н., Мешков О. И., Мальцева Ю. И., Никифоров Д. А., Павленко А. В., Фань К. Измерение параметров ВЧ-пушки линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника фотонов // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 14–27. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27

© Ма С., Арсентьева М. В., Батраков А. М., Левичев А. Е., Волков В. Н., Мешков О. И.,
Мальцева Ю. И., Никифоров Д. А., Павленко А. В., Фань К., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 1
Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 1

Measurement of the Parameters of the RF Gun of the Linear Accelerator of the Siberian Ring Source of Photons

Ma Xiaochao¹, Mariya V. Arsenyeva², Aleksandr M. Batrakov³,
Vladimir N. Volkov⁴, Aleksey E. Levichev⁵, Yulia I. Maltseva⁶, Oleg I. Meshkov⁷
Danila A. Nikiforov⁸, Anton V. Pavlenko⁹, Fan Kuanjun¹⁰

¹⁻⁹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

^{2,6}Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

⁷Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

¹⁰Huazhong University of Science and Technology
Wuhan, China

^{2,8}SRF “SKIF”

Koltsovo, Russian Federation

¹maxiaochao199212@icloud.com, ²M.V.Arsentyeva@inp.nsk.su

³A.M.Batrakov@inp.nsk.su, ⁴V.N.Volkov@inp.nsk.su

⁵A.E.Levichev@inp.nsk.su, ⁶Yu.I.Maltseva@inp.nsk.su

⁷O.I.Meshkov@inp.nsk.su, ⁸D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

⁹A.V.Pavlenko@inp.nsk.su, ¹⁰kjfan@hust.edu.cn

Abstract

The paper analyzes the results of the first experiments to obtain the design parameters of the RF cannon beam of the linear accelerator of the Siberian Ring Synchrotron Radiation Source (SKIF) and describes the diagnostic methods used in this case. The studied parameters include the transverse and longitudinal profiles of the beam, its emittance, energy and energy spread, current, charge and particle losses. The obtained values are compared with the numerical simulation data.

Keywords

SKIF, RF gun, phosphor sensor, magnetic spectrometer, streak-camera, Cherenkov radiation, Faraday cup

For citation

Ma X., Arsenyeva M. V., Batrakov A. M., Volkov V. N., Levichev A. E., Maltseva Yu. I., Meshkov O. I., Nikiforov D. A., Pavlenko A. V., Fan K. Measurement of the Parameters of the RF Gun of the Linear Accelerator of the Siberian Ring Source of Photons. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 14–27. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27

Введение

В Институте ядерной физики (ИЯФ СО РАН) ведется строительство источника синхротронного излучения 4-го поколения СКИФ [1]. ВЧ-пушка линейного ускорителя инжекционного комплекса СКИФ является первичным источником электронов для всей установки. Для измерения параметров пучка ВЧ-пушка оснащена набором диагностик, которые были в полной мере задействованы с момента начала получения проектных параметров ускорителя. В диагностический комплекс входят люминофорный экран, черенковский детектор, дипольный магнитный спектрометр, цилиндр Фарадея, быстродействующий трансформатор тока (ФСТ) и монитор положения пучка (ВМР), которые соответственно используются для исследования поперечного и продольного размеров пучка, его энергии и энергетического разброса, заряда, тока и положения пучка в вакуумной камере.

При выборе средств диагностики пучка мы опирались на проверенные методы, которые, однако же, адаптировались и трансформировались под конкретную задачу: диапазон энергий, геометрических размеров и заряда электронного пучка ВЧ-пушки. В статье кратко охарактеризованы все примененные методы диагностики пучка и полученные с их помощью результаты. Эти же диагностические средства станут в дальнейшем штатными инструментами на установ-

ке для ее настройки и эксплуатации в составе комплекса СКИФ. Более подробно с описанием всех диагностик пучка линейного ускорителя СКИФ можно познакомиться в [2].

1. ВЧ-пушка линейного ускорителя СКИФ

Проект источника синхротронного излучения СКИФ начал осуществляться в феврале 2018 г. [1]. В качестве инжектора в СКИФ используется линейный ускоритель с энергией электронов $E = 200$ МэВ и бустер на энергию 3 ГэВ. ВЧ-пушка, группирователь третьей гармоники, предускоритель и система регулярных ускоряющих структур являются основными компонентами линейного ускорителя [3]. Конфигурация линейного ускорителя, которая проходит сейчас тестирование на специальном стенде, показана на рис. 1. Источник электронов с энергией $E = 0,6$ МэВ основан на ВЧ-пушке (рис. 2) с термоэмиссионным катодом. ВЧ-пушка работает на частоте 178,5 МГц, что является половинной частотой резонатора бустера и накопителя СКИФ и 1/16 частоты 2856 МГц, на которой работает регулярная ускоряющая структура линейного ускорителя [3].

Мощность в резонатор пушки поступает через коаксиальный фидер от полупроводникового усилителя, разработанного компанией «Триада ТВ» (г. Новосибирск) [4]. Данный усилитель обеспечивает импульс мощности до 700 кВт длительностью до 100 мкс с частотой 178,5 МГц и повторением до 10 Гц. Выходная средняя энергия пучка должна составлять в районе 0,8 МэВ. Электронные сгустки пучка получают посредством термоэмиссии из диспенсерного катода с сеточным управлением. Катод крепится внутри резонатора ВЧ-пушки на вакуумном фланце, а с внешней стороны размещается модулятор для управления током катода. Когда фаза ВЧ синусоидального напряжения в резонаторе достигает 40° , триггерный импульс длительностью 1 нс прикладывается к промежутку катод–сетка и генерирует электронный пучок. Пучок ускоряется полем резонатора до энергии $E = 600$ кэВ. Пушка работает в импульсном режиме с частотой повторения 1 Гц. Существует возможность использовать более высокую частоту повторения, до 20 Гц. Расчетные и достигнутые параметры ВЧ-пушки представлены в таблице.

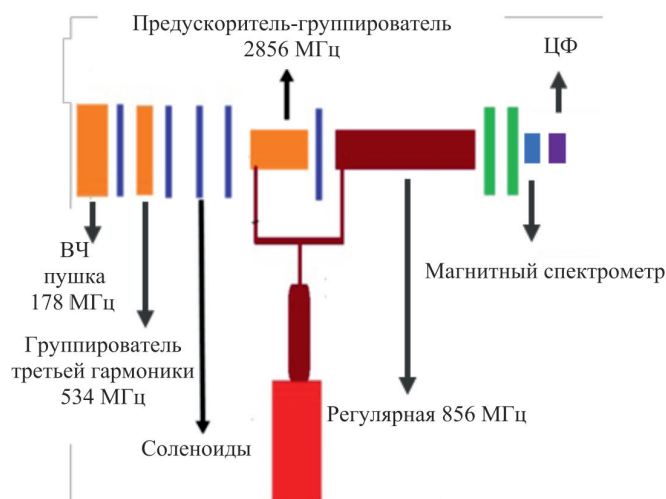


Рис. 1. Структура линейного ускорителя, первая ступень

Fig. 1. Linear accelerator structure, first stage

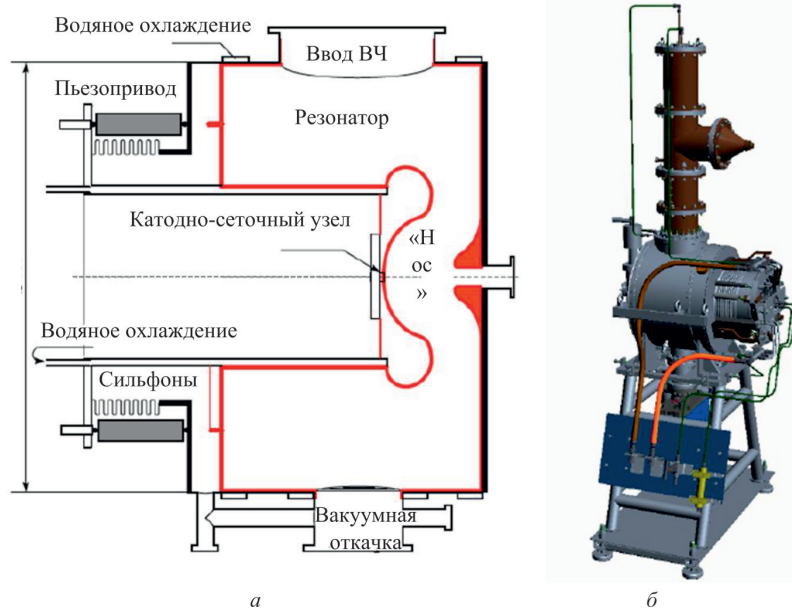


Рис. 2. Схема и общий вид ВЧ-пушки: а – конструкция резонатора, б – 3D-модель
Fig. 2. Scheme and general view of the RF gun: а – resonator design, б – 3D model

Расчетные параметры ВЧ-пушки линейного ускорителя СКИФ

Calculated Parameters of the RF Gun of the SKIF Linear Accelerator

Параметры	Значение
Резонансная частота	178,5 МГц
Собственная добротность	14 700
Эффективное сопротивление	57,4 Ом
Коэффициент времени прохождения	0,995
Максимальное осевое электрическое поле	13 МВ/м
Импульсная мощность	До 700 кВт
Энергия пучка	0,6–0,7 МэВ
Заряд одиночного сгустка	0,3–1 нКл
Количество сгустков в пучке	1–55

2. Система диагностики параметров пучка ВЧ-пушки

В комплекс диагностики ВЧ-пушки входят люминофорный экран для измерения поперечных размеров пучка, черенковский датчик для измерения продольного распределения частиц, дипольный магнитный спектрометр для измерения энергии и энергетического разброса пучка, цилиндр Фарадея, а также монитор положения пучка (ВРМ). Общая схема диагностики показана на рис. 3.

Подробное описание всех методов диагностики представлено в [3]. Дополнительно следует упомянуть радиационный датчик, оказавшийся полезным на первых этапах получения пучка. Стандартная конструкция датчика состояла из сцинтиллятора на основе кристалла CsI или пластмассы, соединенных с фотоумножителем (ФЭУ). Датчик, расположенный вблизи вакуумной камеры, регистрировал потери пучка на элементах конструкции пушки, и позволял

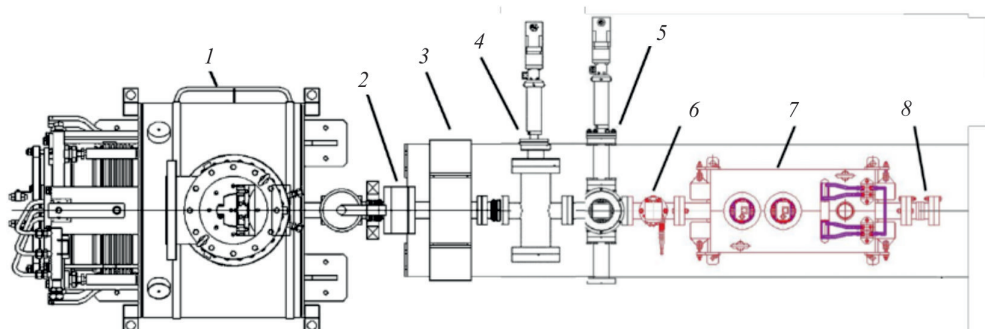
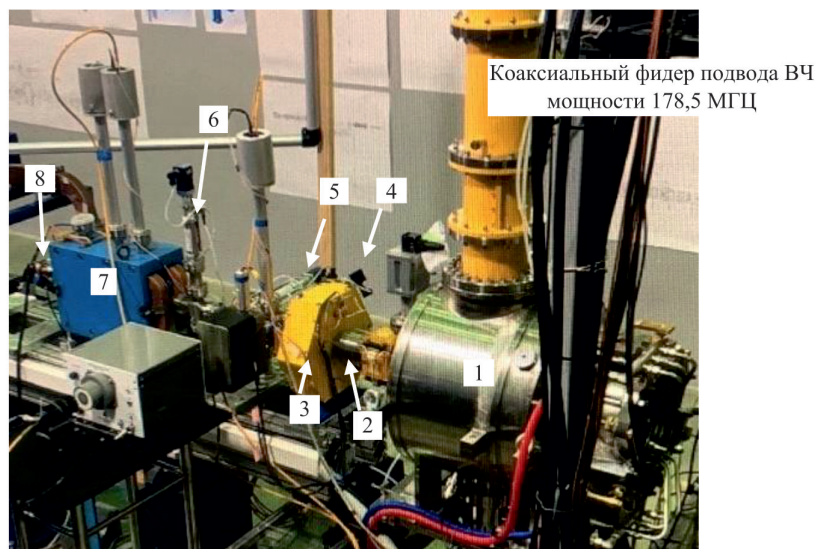


Рис. 3. Внешний вид и схема измерения параметров пучка электронной ВЧ-пушки: 1 – ВЧ-пушка; 2 – ФСТ; 3 – соленоид; 4 – черенковский датчик; 5 – люминофорный экран; 6 – коллиматор; 7 – спектрометр; 8 – цилиндр Фарадея
Fig. 3. Appearance and scheme for measuring the beam parameters of an electron RF gun: 1 – RF gun; 2 – FCT; 3 – solenoid; 4 – Cherenkov sensor; 5 – phosphor screen; 6 – collimator; 7 – spectrometer; 8 – Faraday cup



а

б

Рис. 4. Осциллограммы ВЧ-импульсов пушки при мощности 320 кВт и радиационного датчика: а – развертка 20 мкс/дел, модулирующий импульс отсутствует, пучка нет; б – 400 пс/дел, применен модулирующий импульс. Радиационный датчик регистрирует потери от пучка
Fig. 4. Waveforms of the microwave pulses of the gun at a power of 320 kW and a radiation sensor: а – scan 20 μ s/div, no modulating pulse, no beam; б – 400 ps/div, modulating pulse applied. The radiation sensor registers the losses from the beam

качественно оценивать режим ее работы (рис. 4). Подобную конструкцию датчика предполагается использовать в системе регистрации потерь накопителя СКИФ [5].

На рис. 4, *а* показаны полные импульсы ВЧ-напряжения длительностью 100 мкс, приложенные к резонатору пушки. При этом модулирующий импульс, отпирающий пушку и создающий пучок электронов, отсутствует. Радиационный датчик регистрирует при этом тормозное излучение электронов темновых токов резонатора. На рис. 4, *б* представлен импульс тормозного излучения с длительностью около 1 нс по полувысоте, возникающий при генерации электронного пучка.

3. Численное моделирование работы пушки и экспериментальные результаты

Для получения результатов мы смоделировали реальный сетчатый катод из ВЧ-триода ГС-34 с использованием кода «particle-in-cell», но без резонатора ВЧ-пушки. Целью моделирования было получение распределения частиц в извлекаемом пучке и трехмерного распределения электромагнитных полей, проникающих через сетку на катоде. Кроме того, с помощью кода CST-Studio отдельно моделировались трехмерные распределения полей резонатора. Рассчитав поля, мы использовали код ASTRA [9] для моделирования динамики пучка. Во всех симуляциях использовалась модель сетки с управляющим напряжением смещения. Детали применения численного кода изложены в [3]. Данные моделирования сравниваются в дальнейшем с полученными экспериментальными результатами.

3.1. Измерение заряд пучка с помощью цилиндра Фарадея

Одной из важных характеристик пучка любого ускорителя является заряд сгустка. Для измерения заряда сгустка ВЧ-пушки использовался цилиндр Фарадея (рис. 5) [6]. Энергия электронов, ускоренных в пушке, составляла около 0,6 МэВ. Длина пробега электронов с такой энергией в любом проводящем материале составляет доли миллиметра. В связи с этим никаких специальных расчетов поглощения частиц для ЦФ, измерявшего заряд пучка из пушки, не проводилось, и его специальная конструкция не разрабатывалась. В качестве ЦФ была использована высоковакуумная часть ввода ВЧ-мощности, имевшая керамическую вставку, позволявшую оторвать приемник пучка от земли (рис. 5). Измеренная емкость на землю приемника пучка составляла 2 пФ.

Для защиты входа осциллографа от перегрузки ЦФ был шунтирован варистором и искровым разрядником. Коаксиальный кабель присоединялся к ЦФ с помощью специальных контактных площадок для снижения паразитной индуктивности (рис. 6, *а*). Типичный сигнал с ЦФ и схема регистрации сигнала с ЦФ широкополосным осциллографом показан на рис. 6, *б*.

Заряд пучка вычислялся численным интегрированием зарегистрированной осциллограммы. Зависимость между зарядом пучка и напряжением смещения ВЧ-пушки показана на рис. 7.

3.2. Измерение поперечных размеров и эмиттанса пучка

Для измерения поперечных размеров и эмиттанса пучка использовались люминофорные экраны. Как и обычно, этот вид диагностики в силу наглядности получаемых результатов оказался востребован и популярен при настройке ускорителя. На рис. 8. показано типичное изображение пучка, зарегистрированное с помощью одного из экранов. Поперечные размеры пучка соответствовали ожидаемым: $\sigma_x = 2,32$ мм, $\sigma_y = 1,49$ мм. Калибровка пространственной шкалы по обеим координатам производилась с помощью нанесенной на экран прямоугольной сетки. Точность измерения размеров пучка определялась точностью измерения размеров координатной сетки при изготовлении экранов, которая оценивается в 2 %.

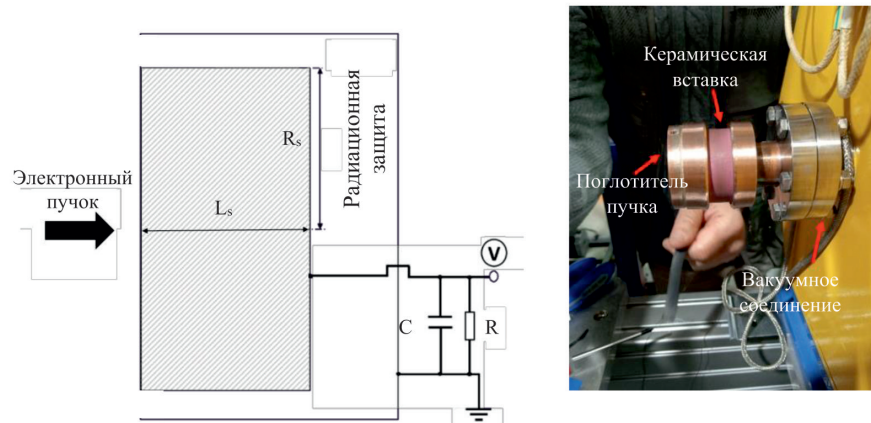


Рис. 5. Схема (а) и внешний вид (б) цилиндра Фарадея
Fig. 5. Scheme (a) and appearance (б) of the Faraday cup

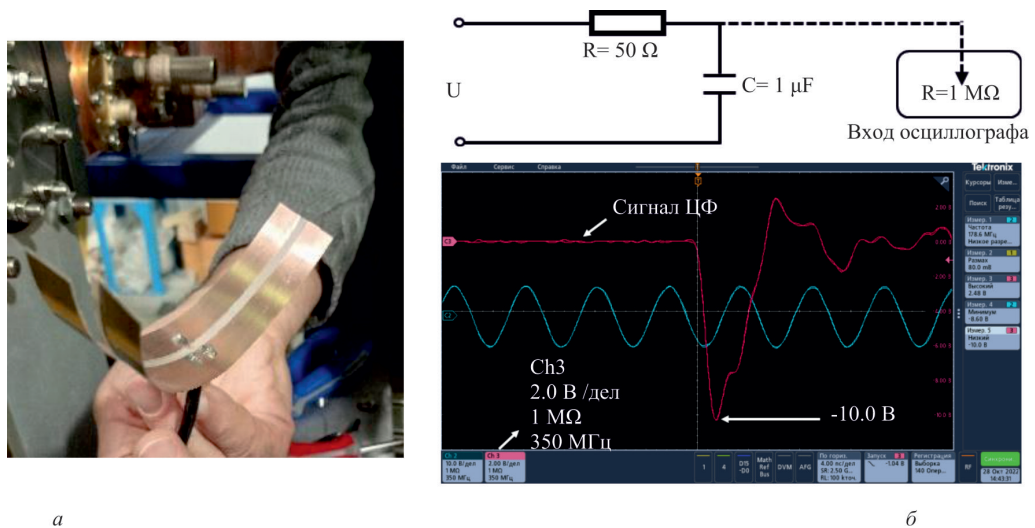


Рис. 6: а – контактные площадки для сигнального кабеля ЦФ, снижающие паразитную индуктивность; б – схема подключения ЦФ для регистрации широкополосного сигнала и типичный сигнал от пучка
Fig. 6: а – contact pads for the CF signal cable reducing parasitic inductance; б – connection diagram of a digital filter for recording a broadband signal and contact pads and a typical signal from a beam

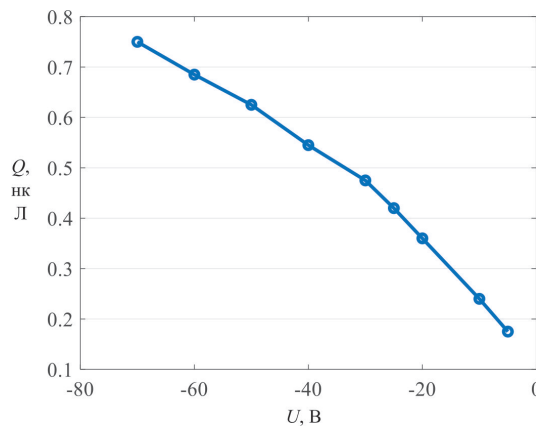


Рис. 7. Зависимость заряда пучка ВЧ-пушки от напряжения модулирующего импульса
Fig. 7. Dependence of the RF gun beam charge on the voltage of the modulating pulse

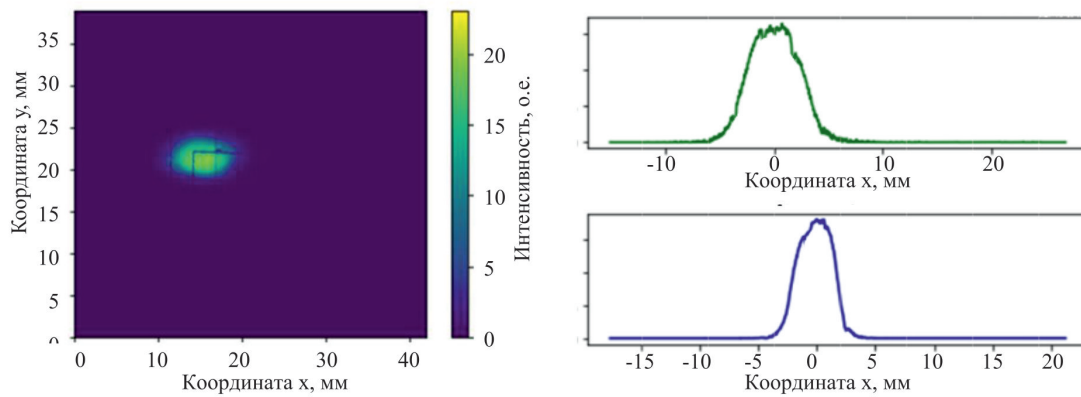


Рис. 8. Типичное изображение пучка, зарегистрированное люминофорным экраном

Fig. 8. Typical beam image recorded by a phosphor screen

Эмиттанс можно получить, измерив зависимость между поперечным размером пучка и напряженностью соленоидального поля с помощью люминофорного экрана, зная расстояние между соленоидом («линзой») и люминофорным экраном [6]. B_{11} по отношению к K является квадратичной функцией, поэтому, варьируя значение K линзы и измеряя соответствующий размер пучка, можно построить корреляцию:

$$B_{11}(K) = a(K - b)^2 + c = aK^2 - 2abK + (c - ab^2), \quad (1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x_0^2 \rangle \langle x_0'^2 \rangle - \langle x_0 x_0' \rangle^2} = \frac{\sqrt{ac}}{S_{12}^2}, \quad (2)$$

где B_{11} – квадрат поперечного размера σ пучка, K – величина, обратная фокусному расстоянию, S_{12} – расположенный на расстоянии от люминофорного экрана.

Для фокусировки пучка использовался соленоид, расположенный на расстоянии 200 мм от люминофорного экрана. Зависимость квадратов размеров пучка σ_x^2, σ_y^2 от расчетной силы фокусировки показаны на рис. 9. Измеренный геометрический эмиттанс пучка хорошо соответствует данным, полученным при моделировании пучки [8].

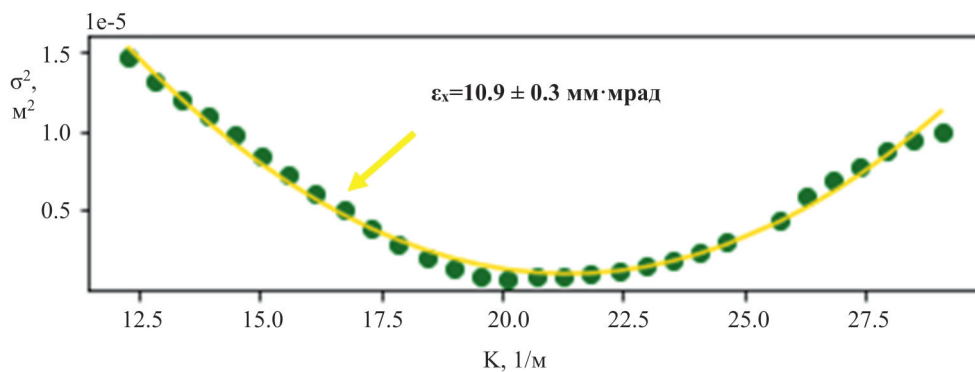


Рис. 9. Определение эмиттанса пучка ВЧ-пучки с помощью соленоидального сканирования

Fig. 9. Determination of the RF gun beam emittance using solenoidal scanning

3.3. Измерение энергии и энергетического разброса пучка

Для измерения энергии и энергетического разброса пучка использовались два метода. Энергия пучка определялась с помощью магнитного корректора MG-LG.СК4 и люминофорного экрана BI-LG.PL2 (рис. 10), а энергетический разброс – с помощью дипольного магнитного спектрометра [2].

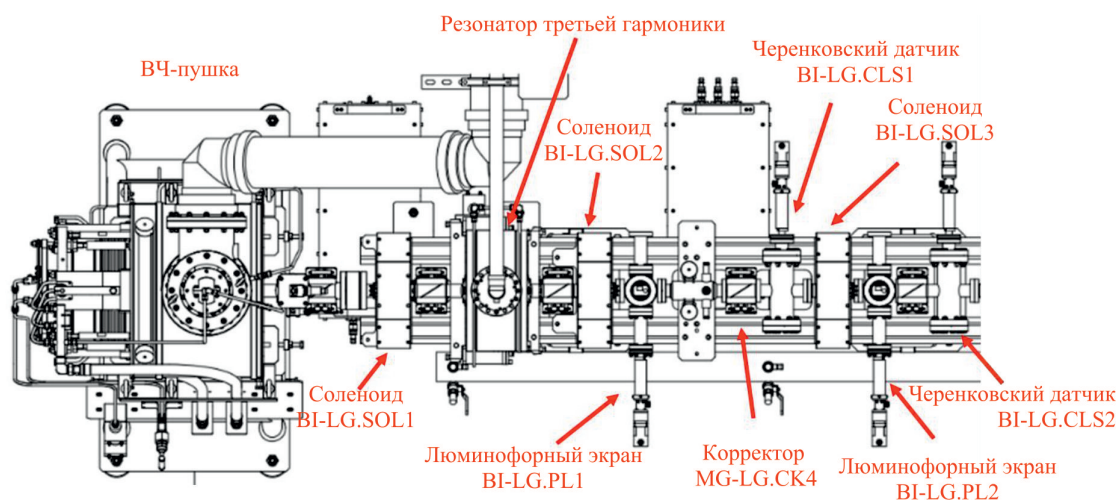
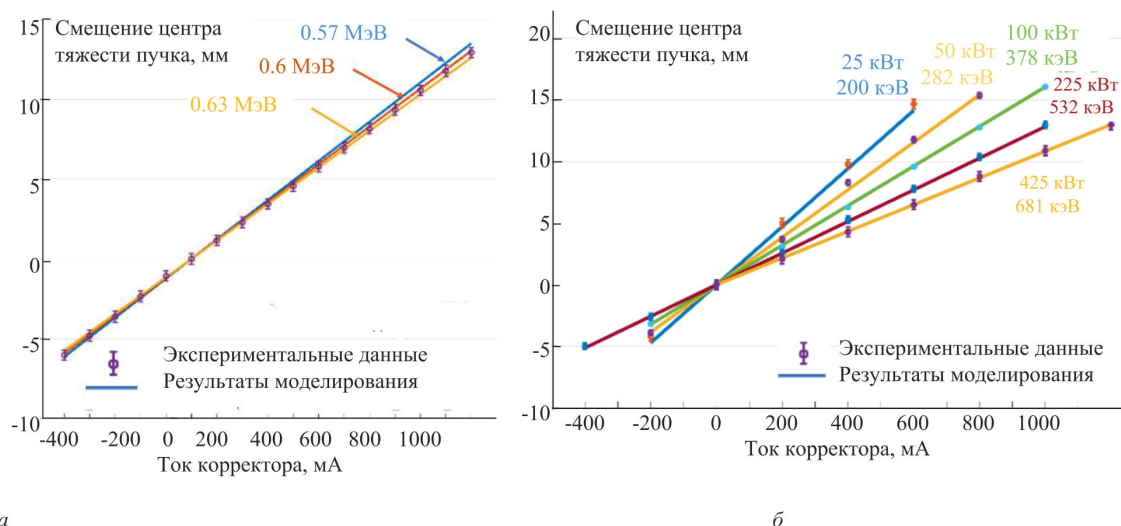


Рис. 10. Схема участка ускорительного тракта, где расположены корректор и люминофор
Fig. 10. Scheme of the section of the accelerating tract, where the corrector and phosphor are located

Энергия пучка вычислялась по его смещению под действием магнитного корректора на люминофорном экране. Точность определения координаты центра тяжести полученных изображений оценивается нами в 5 % от FWHM, что определяется точностью нахождения максимума у зарегистрированного профиля пучка с помощью встроенной функции `python`. На рис. 11, а, приведено сравнение результатов моделирования смещения пучка с помощью пакета FLUKA [7] и экспериментальных результатов, соответствующих энергии пучка $E = 0,6 \pm 0,03$ МэВ.



а

б

Рис. 11. Измерение энергии пучка по его смещению на люминофорном экране под действием магнитного корректора

Fig. 11. Beam energy is measured by the displacement of the beam on the fluorescent screen under the action of a magnetic corrector

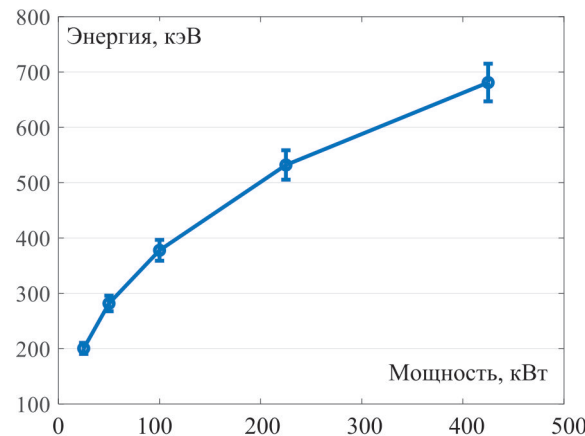


Рис. 12. Измеренные энергии пучка в зависимости от ВЧ-мощности, приложенной к резонатору пушки
 Fig. 12. Measured beam energies as a function of RF power applied to the gun resonator

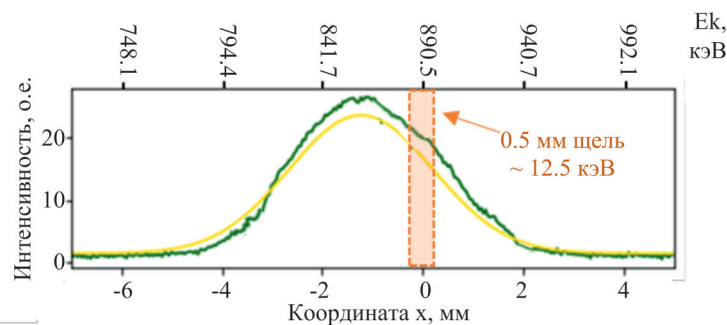


Рис. 13. Определение энергетического разброса пучка с помощью магнитного спектрометра. Зеленая кривая – зарегистрированный профиль пучка, желтая кривая – подгонка гауссовым распределением
 Fig. 13. Determination of the energy spread of the beam using a magnetic spectrometer. Green line — registered profile of the beam, yellow line — Gauss distribution refinement

Аналогичным методом была измерена зависимость энергии пучка от ВЧ-мощности, приложенной к резонатору ВЧ-пушки. Соответствующие зависимости представлены на рис. 11, б, а на рис. 12 показано найденное соотношение между измеренным значением энергии пучка и ВЧ-мощностью.

Использовать магнитный спектрометр для измерения энергии не удалось, так как мы не могли корректно определить координату и угол влета пучка в спектрометр, что приводило к большой систематической ошибке. Спектрометр использовался для измерения энергетического разброса с помощью коллимирования пучка на входе [2]. Полученная величина разброса равна $\Delta E = 35 \pm 7$ кэВ (рис. 13). Погрешность измерений определяется шириной щели коллиматора, равной 0,5 мм.

3.4. Измерение продольного размера пучка

Схема измерений продольного размера пучка с помощью черенковского датчика и стрик-камеры показана на рис. 14, а. В качестве радиатора черенковского света использовалась кварцевая пластина толщиной 0,5 мм. Электроны с энергией 0,6 МэВ испытывают сильное рассеяние в кварце и полностью поглощаются в пластине такой толщины. Черенковское излучение, вследствие этого, имеет широкое угловое распределение на выходе из радиатора (рис. 15) [2].

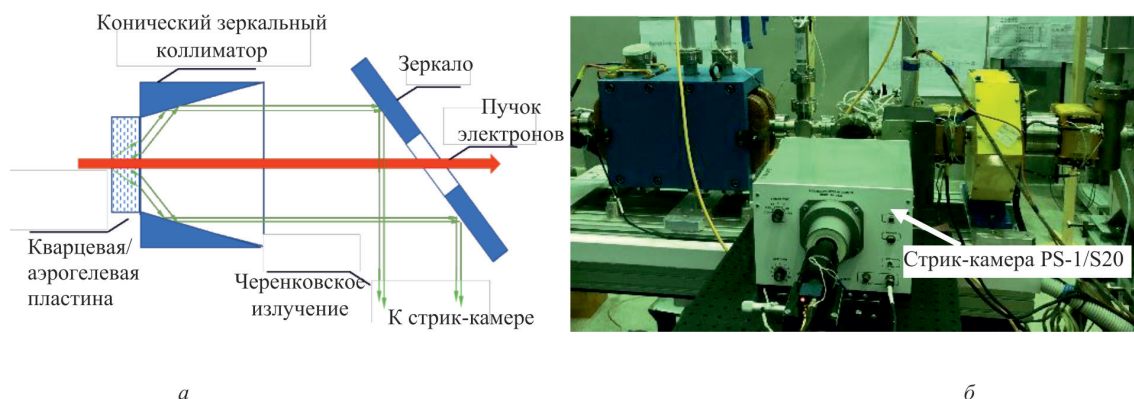


Рис. 14. Устройство черенковского датчика (а) и внешний вид диагностики (б)

Fig. 14. The device of the Cherenkov sensor (a) and appearance (b)

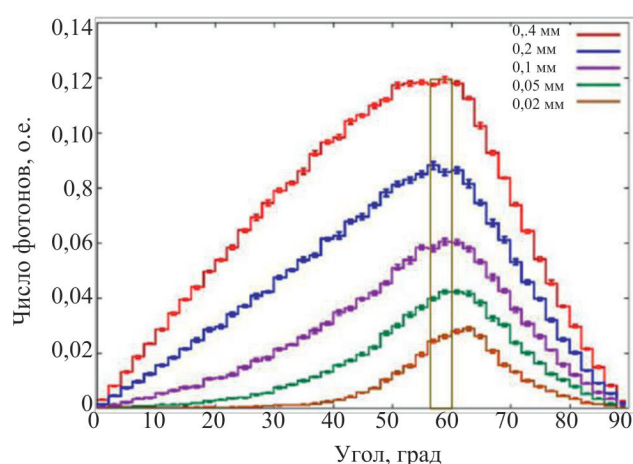


Рис. 15. Угловое распределение черенковского излучения пучка электронов с энергией 0,6 МэВ, проходящего через кварцевую пластину разной толщины. Выделен диапазон по углу в 3,5 градуса

Fig. 15. Angular distribution of the Cherenkov radiation of an electron beam with the energy of 0.6 MeV passing through a quartz plate of different thicknesses. Angle range of 3.5 degrees was selected

Вследствие этого в апертуру объектива, собирающего свет на фотокатод стрик-камеры, попадает лишь малая часть черенковских фотонов. По данным моделирования [2] при заряде пучка в 1 нК, фотокатода достигнет около 2×10^9 фотонов, чего, тем не менее, достаточно для надежной регистрации продольного профиля пучка, что и подтвердилось экспериментально.

Типичный продольный профиль пучка представлен на рис. 16, а. Временное разрешение диагностики 8,5 пс ограничивалось достигнутым размером изображения пучка на фотокатоде стрик-камеры. В подтверждение этого тезиса на рис. 16, б совмещены горизонтальный и вертикальный профили зарегистрированного изображения. Как видно, левый склон горизонтального сечения изображения практически совпадает с левым склоном вертикального сечения изображения. Это говорит о том, что аппаратная функция, т. е. временное разрешение стрик-камеры, определяется резкостью фокусировки. На этом этапе мы не стали принимать дополнительных мер для ее улучшения, поэтому нельзя исключить, что продольный профиль пучка может иметь более крутой передний фронт.

На рис. 17 представлены расчетная и модельная зависимости длительности пучка FWHM в зависимости от фазы ВЧ-мощности резонатора третьей гармоники. Согласие между двумя зависимостями скорее качественное, демонстрирующее возможность существенного уменьшения длины пучка перед его прохождением через ускоритель-предгруппирователь. Это

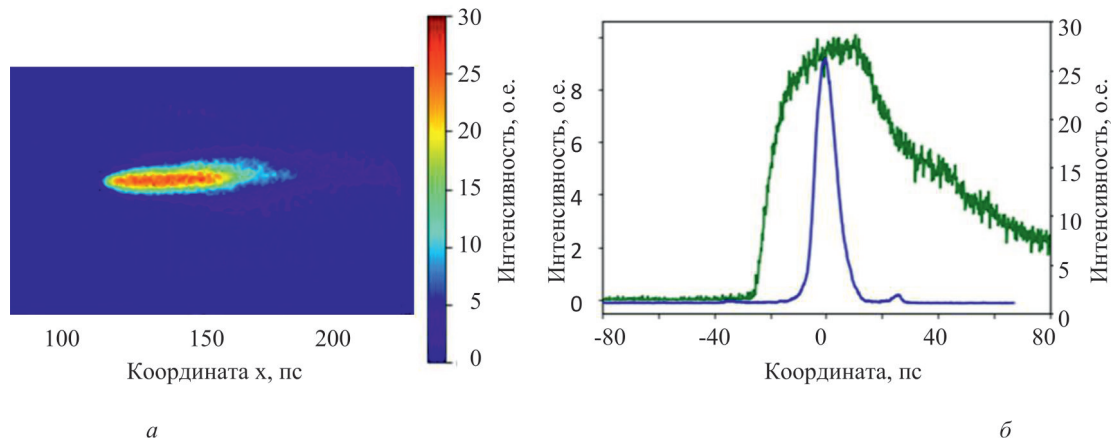


Рис. 16. Изображение (а) и продольное распределение пучка (б), зарегистрированные при фазе резонатора ВЧ-пушки $U_m = 70$ В. Длина пучка FWHM = 65 пс. Зеленая кривая – горизонтальное центральное сечение изображения, синяя кривая – вертикальное центральное сечение изображения

Fig. 16. Image (a) and longitudinal distribution (b) of the beam recorded at the phase of the RF gun resonator is -0.78 rad and modulator voltage $U_m = 70$ V. Beam length FWHM = 65 ps. Green curve is the horizontal central section of the image; blue curve is the vertical central section of the image

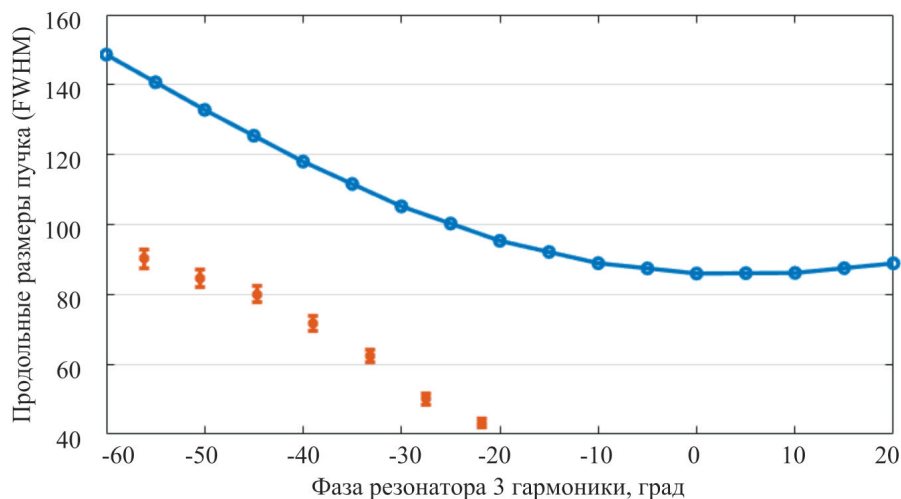


Рис. 17. Продольные размеры пучка (FWHM), зарегистрированные при разных фазах резонатора ВЧ-пушки черенковским датчиком при напряжении модулятора $U_m = 70$ В (оранжевые точки), и результаты моделирования (синие точки)

Fig. 17. Longitudinal beam dimensions (FWHM) recorded at different phases of the RF gun resonator by a Cherenkov sensor at modulator voltage $U_m = 70$ V (yellow), and simulation results (blue)

не должно вызывать удивления, так как результатом моделирования является продольная дисперсия пучка, но на практике его форма далека от гауссовой.

Заключение

В ИЯФ СО РАН на специализированном стенде начаты эксперименты с ВЧ-пушкой линейного ускорителя инжекционного комплекса СКИФ. Стенд оснащен развитым набором диагностик для измерения и контроля параметров пучка пушки. К настоящему моменту получены проектные параметры пучка: энергия, энергетический разброс, эмиттанс, заряд, поперечные размеры, длительность сгустка и количество сгустков в пучке. Измеренные параметрические

зависимости основных характеристик пучка ВЧ-пушки находятся в качественном согласии с результатами численного моделирования. Целью дальнейших экспериментов является получение проектных параметров пучка первой очереди линейного ускорителя.

Список литературы

1. **Bogomyagkov A.** (2021). Status of the Novosibirsk fourth-generation light source SKIF. In Proc. XXVII Russian Particle Accelerators Conference, JACoW.
2. **Xiaochao M, Maltseva Y I, Meshkov O I, et al.** Beam diagnostics for linear accelerator of SKIF synchrotron light source[J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(04): T04001.
3. **Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., ... & Volkov V.** (2022). Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector. Journal of Instrumentation, 17(02), T02009.
4. Коаксиальный фидер от полупроводникового усилителя, Триада ТВ, <https://triadatv.ru/>
5. **Maltseva Y. I., Ivanenko S. V., Khilchenko A. D., Ma X. C., Meshkov O. I., Morsina A. A., & Puryga, E. A.** (2022). Beam loss monitoring system for the SKIF synchrotron light source. Journal of Instrumentation, 17(05), T05004.
6. **Смалюк В В.** Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях [J]. Новосибирск: Параллель, 2009: 294.
7. **A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft,** FLUKA: A Multi-Particle Transport Code, December 14, 2005.
8. **Арсентьева Мария Васильевна.** Разработка структуры резонаторов W-диапазона // дисс. ...канд. физико-матем. наук, Новосибирск, 2022.
9. Astra: A Space Charge Tracking Algorithm, <http://www.desy.de/~mpyflo>

References

1. **Bogomyagkov A.** Status of the Novosibirsk fourth-generation light source SKIF // Proc. XXVII Russian Particle Accelerators Conference. JACoW. 2021.
2. **Xiaochao, M., Maltseva, Y., Meshkov, O., Arsentyeva, M., Bekhtenev, E., Cheskidov, V., Borin, V., Karpov, G., Nikiforov, D., Pavlov, O., Volkov, V.** Beam diagnostics for linear accelerator of SKIF synchrotron light source // Journal of Instrumentation. 2022, 17(04): T04001.
3. **Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., Volkov V.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // Journal of Instrumentation. 2022. Vol. 17, no. 2. T02009.
4. Coaxial feeder from semiconductor amplifier, Triada TV, <https://triadatv.ru/> (01.04.2023)
5. **Maltseva Y., Ivanenko S., Khilchenko A., Ma X., Meshkov O., Morsina A., Puryga, E.** Beam loss monitoring system for the SKIF synchrotron light source // Journal of Instrumentation. 17(05), T05004.
6. **Smalyuk, V.** Diagnostics of charged particle beams in accelerators // Ed. Corr. RAS N.S. Dikansky. Novosibirsk: Parallel. 2009: 294.
7. **Ferrari, A., Sala, P., Fasso, A., Ranft, J.** FLUKA: A Multi-Particle Transport Code (Program version 2005) // Cern, 2005.
8. **Arsentyeva M.** Development of the structure of W-band resonators // Dissertation for a degree of candidate of physico-mathematical sciences. Novosibirsk, 2022.
9. **Floettmann, K.** ASTRA – Space Charge Tracking Algorithm // Technical Report. DESY, Hamburg, Germany, Mar, 2017.

Информация об авторах

Ма Сяочао, аспирант

Арсентьева Мария Васильевна, кандидат физико-математических наук

Батраков Александр Матвеевич, доктор физико-математических наук

Волков Владимир Николаевич, кандидат физико-технических наук

Левичев Алексей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук

Мальцева Юлия Игоревна, кандидат физико-математических наук

Мешков Олег Игоревич, доктор физико-математических наук

Никифоров Данила Алексеевич, научный сотрудник

Павленко Антон Владимирович, кандидат физико-математических наук

Фань Куаньцзюнь, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Ma Xiaochao, Ph.D student, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

Mariya V. Arsentyeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk State University, SRF "SKIF" (Koltsovo, Russia)

Aleksandr M. Batrakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

Vladimir N. Volkov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

Aleksey E. Levichev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

Yulia I. Maltseva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk State Technical University

Oleg I. Meshkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk State University

Danila A. Nikiforov, researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk State University, SRF "SKIF" (Koltsovo, Russia)

Anton V. Pavlenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk State University

Fan Kuanjun, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Huazhong University of Science and Technology (Wuhan, China)

*Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023;
принята к публикации 10.04.2023*

*The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 10.04.2023;
accepted for publication 10.04.2023*