

Научная статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-81-90

Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов*

Екатерина Рамисовна Хабибуллина^{1,3}, Геннадий Николаевич Кропачев^{1,2}
Тимур Вячеславович Кулевой^{1,3}, Ольга Сергеевна Сергеева¹
Ирина Владиславовна Кильметова¹, Владимир Сергеевич Скачков¹
Александр Сергеевич Борисков⁴, Максим Алексеевич Гузов⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Московская область, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

⁴Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ)
Саров, Россия

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹sergeeva@itep.ru

¹irina.kilmetova@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

⁴ASBoriskov@vniief.ru

⁴maguzov@vniief.ru

Аннотация

В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ (Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики) разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа. Канал транспортировки пучков низкой энергии LEBT осуществляет транспортировку пучка от лазерно-плазменного источника многозарядных ионов с A/Z от 4 до 8 (вплоть до Bi^{27+}) до ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). В статье представлены результаты моделирования динамики пучка в канале LEBT с учетом трехмерной карты распределения поля магнитных элементов, обеспечивающие сепарацию рабочей фракции ионного пучка и его согласование с ускоряющей структурой RFQ.

Ключевые слова

LEBT, моделирование динамики пучка, тяжелые ионы

Для цитирования

Хабибуллина Е. Р., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Сергеева О. С., Кильметова И. В., Скачков В. С., Борисков А. С., Гузов М. А. Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 81–90. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-81-90

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

Lebt of the Heavy Ion Linear Accelerator

Ekaterina R. Khabibullina^{1,3}, Gennady N. Kropachev^{1,2}, Timur V. Kulevoy^{1,3}
Olga S. Sergeeva¹, Irina V. Kilmetova¹, Vladimir S. Skachkov¹
Alexander S. Boriskov⁴, Maxim A. Guzov⁴

¹NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russian Federation

³National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russian Federation

⁴FSUE RFNC – VNIIEF, Sarov, Russian Federation

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹sergeeva@itep.ru

¹irina.kilmetova@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

⁴ASBoriskov@vniief.ru

⁴maguzov@vniief.ru

Abstract

At the NRC “Kurchatov Institute” (Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics), the pulsed linear resonant heavy ion accelerator is being developed. The Low Energy Beam Transport (LEBT) channel transports the beam from a laser-plasma source of multi-charged ions with an A/Z ratio from 4 to 8 (up to Bi²⁷⁺) to the RFQ. This paper shares the results of the beam dynamics simulation of the LEBT, which ensures the separation of the working fraction of the ion beam and its matching with the RFQ.

Keywords

LEBT, beam dynamics simulation, heavy ions

For citation

Khabibullina E. R., Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sergeeva O. S., Kilmetova I. V., Skachkov V. S., Boriskov A. S., Guzov M. A. Lebt of the heavy ion linear accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 81–90 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-81-90

Введение

В рамках проекта по созданию Ускорительного комплекса для Синхротронного комплекса исследований воздействия ионизирующих излучений космического пространства для экспериментальных работ на ионных пучках [1; 2] сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа (ЛУ2). ЛУ2 состоит из лазерно-плазменного источника ионов, секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и двух ускоряюще-фокусирующих каналов с трубками дрейфа (DTL), между которыми расположены каналы согласования (обеспечивающие 6-мерное согласование пучка). Канал транспортировки пучка низкой энергии (LEBT) предназначен для очистки основного сорта ионов с отношением с A/Z от 4 до 8 (вплоть до ²⁰⁹Bi²⁷⁺) от нецелевых компонент, инжектируемых из ЛПИТИ (Лазерно-плазменный источник тяжелых ионов), и осуществляет поперечное согласование пучка с ускоряющей секцией RFQ.

При разработке канала транспортировки пучка низкой энергии учитывались следующие требования:

- использование схемы канала LEBT, состоящей из двух плеч и объединяющего устройства, для обеспечения последовательного (по времени) режима работы для различных типов ионов;
- уменьшение роста поперечного эмиттansa пучка в канале;
- достижение максимальной сепарации основного сорта ионов от примесных частиц;

- обеспечение 4-мерного аксиально-симметричного согласованного пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$ на входе в ускоряющую структуру RFQ;
- компактность: общая длина канала не должна превышать 7 м; максимальное расстояние между плечом, на котором расположена система экстракции, и плечом, где проходит ось ЛУ, не должна превышать 2 м;
- установка вакуумной системы и системы диагностики пучка;
- возможность регулировки поперечных размеров и интенсивности пучка ионов при инжекции в канал LEBT.

Общий эскиз канала представлен на рис. 1 [3].

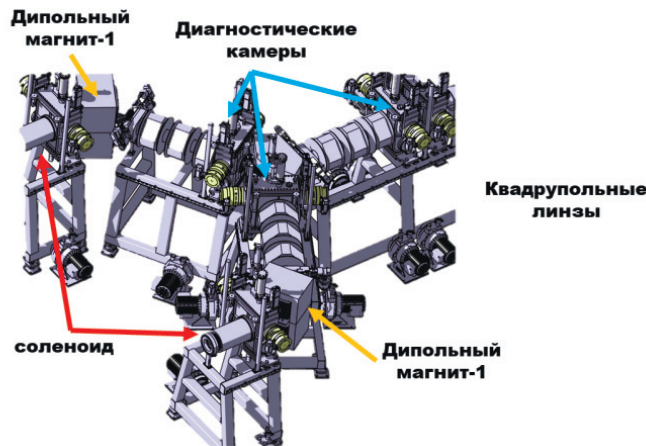


Рис. 1. Макет низкоэнергетического канала LEBT
Fig. 1. Layout of the low-energy LEBT channel

По предварительным расчетам, общий ток пучка на выходе из ЛПИТИ может составлять до 110 мА, что приведет к возникновению значительных по величине сил пространственного заряда, оказывающих дефокусирующее действие при транспортировке ионного пучка. В расчетах динамики пучка учитывалась компенсация объемного заряда на уровне 80 %.

Основные параметры пучка в канале транспортировки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры канала LEBT

Table 1

Main parameters of the LEBT	
Параметр	Значение
Отношение заряда к массе иона	$1/8 \leq Z/A \leq 1/4$
Рабочая фракция пучка, Z	27+(для ^{209}Bi)
Ток пучка, мА	110
Длительность импульса тока, мкс	до 5
Частота повторения импульсов, Гц	до 1
Напряжение инжекции, кВ	70
Относительная скорость	0,004334(для $^{209}\text{Bi}^{27+}$)
Общая длина LEBT, м	до 7
Апертура канала, мм	Ø140 (Ø100 – в поворотных магнитах)

Низкоэнергетический канал транспортировки пучка состоит из двух основных участков:

1. Участок s-образного типа, содержащий поворотные магнит для сепарации рабочего сорта иона $^{209}\text{Bi}^{27+}$ от примесей и объединяющий магнит для вывода пучка на ось ЛУ.
2. Прямолинейный участок, обеспечивающий согласование пучка с ускоряющей секцией RFQ.

Схема канала транспортировки LEBT представлена на рис. 2.

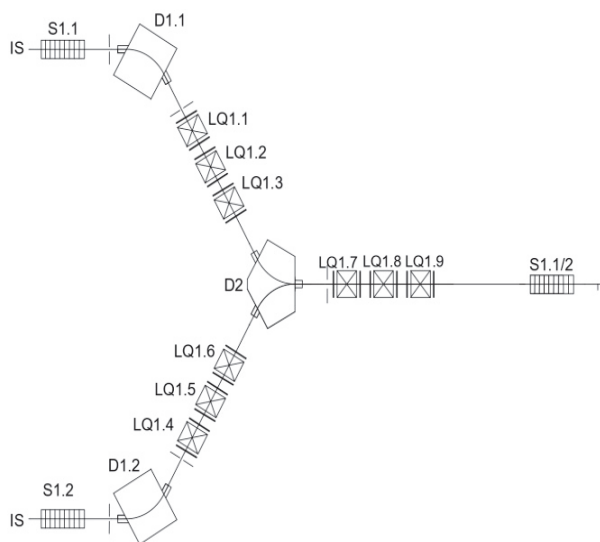


Рис. 2. Общая схема канала транспортировки LEBT: S1.1, S1.2, S1.1/2 – соленоиды; D1.1, D1.2 – поворотные магниты; D2 – объединяющий магнит; LQ1.1-LQ1.9 – квадрупольные электромагнитные линзы; IS – источник ионов; RFQ – ускоритель RFQ

Fig. 2. General layout of the LEBT: S1.1, S1.2, S1.1/2 – solenoids; D1.1, D1.2 – bending magnets; D2 – unifying magnet; LQ1.1-LQ1.9 – quadrupole lenses; IS – ion source; RFQ – RFQ accelerator

Расчет динамики пучка в LEBT

Участок *tuna s-shape*

Расчет динамики пучка проводился с использованием трехмерной карты магнитного поля всех магнитных элементов, включая соленоиды, поворотные магниты [4], квадрупольные линзы [3], разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ.

Моделирование динамики пучка в канале транспортировки LEBT на участке сепарации проводилось в программе Kobra3-INP [5]. Преимуществами данной программы являются:

- возможность одновременной работы с различными типами ионов;
- учет объемной плотности заряда пучка при его транспортировке;
- возможность задания степени компенсации пространственного заряда;
- использование трехмерных моделей пространственного распределения поля магнитных элементов.

На рис. 3 представлен спектр ионов висмута на выходе системы экстракции при напряжении 70 кВ и общем токе пучка 110 мА.

Первоначальная фокусировка многокомпонентного аксиально-симметричного пучка, выходящего из системы экстракции, происходит с помощью соленоида (рис. 4, а), габаритная длина которого 400 мм, магнитная апертура – 150 мм, величина магнитного поля на оси – 0,87 Тл. После соленоида предусмотрено место для установки вакуумных насосов и диагностического блока. В конце дрейфа располагается диафрагма круглого сечения (рис. 4, б).

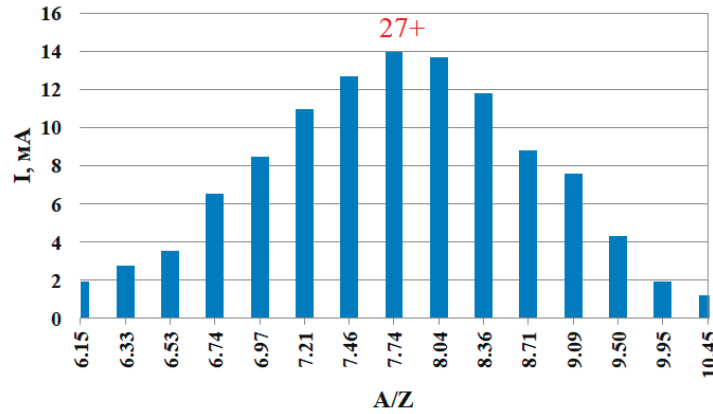


Рис. 3. Спектр ионов Bi_{20-34}^{209} при напряжении инжекции 70 кВ

Fig. 3. Spectrum of Bi_{20-34}^{209} at the injection voltage of 70 kV

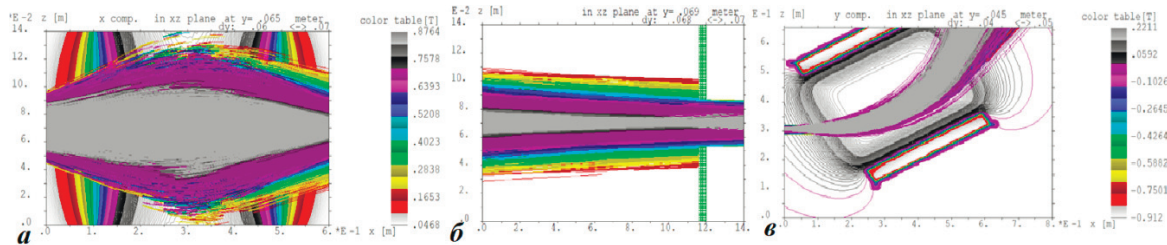


Рис. 4. Траектории движения пучка ионов Bi_{20-34}^{209} в горизонтальной плоскости при прохождении: а – соленоида S1.1; б – диафрагмы круглого сечения SLIT2; в – поворотного магнита D1.1 в канале транспортировки LEBT

Fig. 4. Beam movement of Bi_{20-34}^{209} in the horizontal plane when passing: а – solenoid S1.1; б – circular diaphragm SLIT2; в – bending magnet D1.1

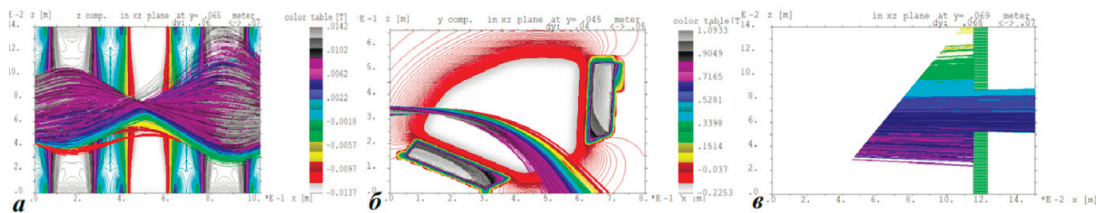


Рис. 5. Траектории движения пучка ионов Bi_{20-34}^{209} в горизонтальной плоскости при прохождении: а – триплета квадрупольных линз LQ1.1-LQ1.3; б – второго поворотного магнита D2; в – третьей диафрагмы прямоугольного сечения SLIT3 в канале транспортировки LEBT

Fig. 5. Beam movement of Bi_{20-34}^{209} in the horizontal plane when passing through: а – triplet of quadrupole lenses LQ1.1-LQ1.3; б – second bending magnet D2; в – rectangular diaphragm SLIT3

Основное разделение частиц происходит в отклоняющем диполе с углом поворота 60° и скосами $30^\circ/30^\circ$ градусов (рис. 4, в), после которого устанавливается диафрагма, состоящая из пары подвижных пластин. Состоящая из поворотного и объединяющего магнитов (рис. 5, б) и триплета квадрупольных линз между ними (рис. 5, а) структура является ахроматической, что позволяет избежать дополнительного роста эмиттанса в плоскости поворота.

После объединяющего магнита на расстоянии ≈ 100 мм установлена прямоугольная диафрагма для заключительной очистки рабочей фракции от примесных частиц (рис. 5, в). На рис. 6 представлен полученный спектр ионов висмута на выходе из последней диафрагмы. Общий ток пучка после диафрагмы – 11,5 мА, в котором содержится 5,2 мА основного сорта ионов.

Предполагается, что окончательная сепарация ионов висмута произойдет в магнитных элементах между ускоряющими секциями RFQ и DTL.

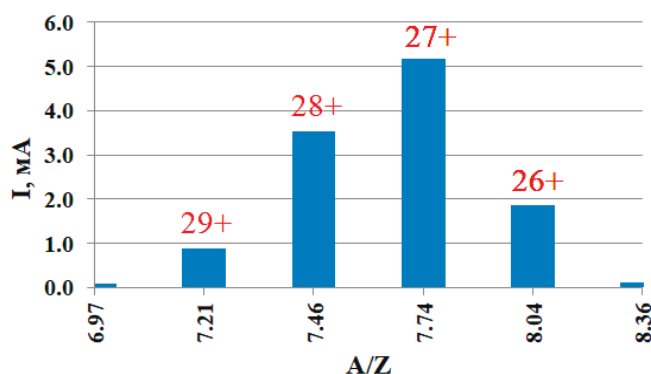


Рис. 6. Спектр пучка ионов Bi_{25-30}^{209} после прохождения диафрагмы SLIT3

Fig. 6. Spectrum of the Bi_{25-30}^{209} after transportation through the SLIT3 diaphragm

Участок согласования с RFQ

Моделирование динамики пучка на участке согласования LEBT с ускоряющей секцией RFQ проводилось в программе TraceWin [6] с визуализацией в среде PlotWin [7].

Требования, предъявляемые к прямолинейного участка согласования пучка с ускоряющей секцией RFQ:

- поперечное согласования пучка с входными рассчитанными параметрами RFQ;
- использование аналогичных магнитных элементов, что и на участке сепарации;
- планирование места расположения диагностического и вакуумного оборудования (≈ 700 мм);
- учет продольных размеров монтажных элементов (соединительных фланцев, шибера, переходного монтажного патрубка и т. д.) при их установке перед структурой RFQ (≈ 300 мм).

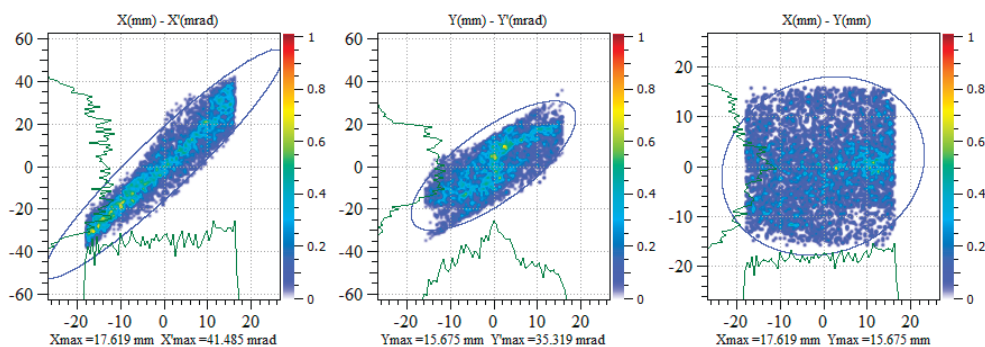


Рис. 7. Фазовый портрет пучка на выходе диафрагмы SLIT3

Fig. 7. Beam phase portrait at the output of the SLIT3 diaphragm

Расчет динамики движения пучка проводился для ионов Bi_{27+}^{209} при токе 11,5 мА, что соответствует току пучка для всего спектра висмута и позволяет учитывать эффект кулоновского

расталкивания всего пучка. В качестве входных параметров ионов на участке согласования использовались фазовые характеристики пучка на выходе последней диафрагмы SLIT3 (рис. 7).

Основными магнитооптическими элементами данного участка являются:

- триплет квадрупольных линз, регулирующий пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях;
- соленоид, обеспечивающий сходящийся аксиально-симметричный пучок на входе в RFQ. Огибающие пучка в канале транспортировки LEBT приведены на рис. 8.

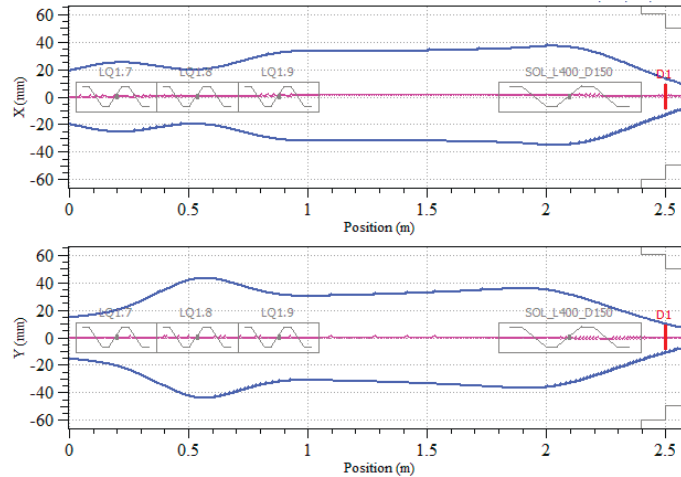


Рис. 8. Огибающие пучка на участке согласования в канале LEBT

Fig. 8. Beam envelopes in the matching section of the LEBT

Фазовые портреты пучка на выходе канала LEBT при токе 11,5 мА для ионов Bi_{27+}^{209} представлены на рис. 9.

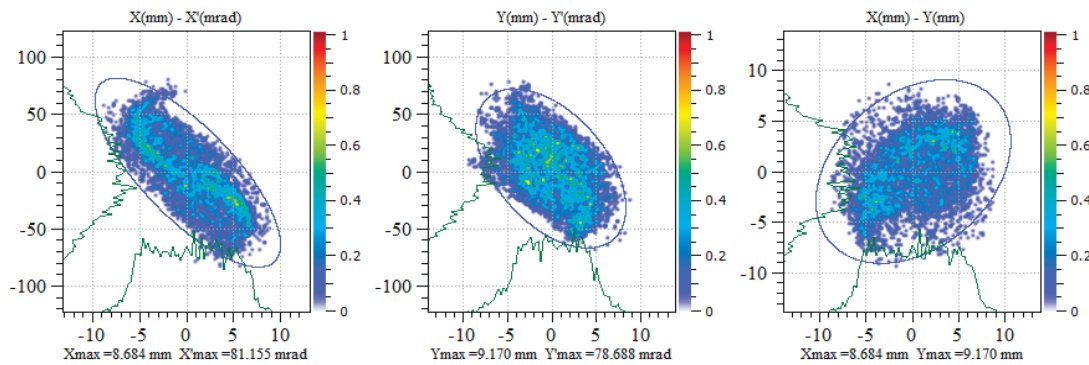


Рис. 9. Фазовый портрет пучка на выходе канала LEBT

Fig. 9. Beam phase portrait at the output of the LEBT

В результате моделирования динамики пучка величина нормализованного среднеквадратичного эмиттанта составила $0.33 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в горизонтальной и вертикальной плоскости, что в 1,3 раза больше расчетного значения на входе в RFQ ($0.25 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$). Это объясняется неизбежным ростом поперечного эмиттанта за счет кулоновских сил отталкивания и влиянием нелинейных полей фокусирующих элементов на пучок частиц. В качестве начального условия для расчета входных параметров пучка в RFQ использовалась методика И. М. Капчинского [8]: отношение нормализованного аксептанта к нормализованному входному эмиттансу принято

$V_k/\varepsilon_{\text{inip}} = 3$. Значения поперечных эмиттансов в LEBT, полученных в результате моделирования, далеки от критических, что позволяет ускорять пучок в RFQ без потерь. Импульсный разброс частиц в пучке сохраняется на уровне $\pm 0,5\%$, что удовлетворяет входным требованиям RFQ.

Основные параметры электромагнитных элементов канала LEBT, используемых при моделировании динамики пучка, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры магнитных элементов канала LEBT

Table 2

Main parameters of the LEBT magnetic elements

Название	Значение	Ед. изм.
Соленоид S1.1		
Магнитное поле на оси, B_{SOL1}	0,87	Тл
Продольная длина, L	400	мм
Магнитная апертура, D_{ap}	150	мм
Поворотный магнит D1.1/D2		
Угол поворота, θ	60/–60	°
Скосы, φ	30 / 30 –D1.1; 30°/0° – D2	°
Радиус поворота осевой траектории, R	400	мм
Межполюсный зазор, D_{ap}	108	мм
Магнитное поле на оси, $B_{\text{D1.1/D2}}$	0,245	Тл
Триплет квадрупольных линз LQ1.1-LQ1.3		
Длина, L/L_{shim}	180/252	мм
Градиент, G	2,71/–2,67/2,71	Тл /м
Апертура, D_{ap}	150	мм
Триплет квадрупольных линз LQ1.7-LQ1.9		
Длина, L/L_{shim}	180/252	мм
Градиент, G	1,42/–1,65/0,79	Тл /м
Апертура, D_{ap}	150	мм
Соленоид S1/2		
Магнитное поле на оси, B_{SOL2}	0,56	Тл
Продольная длина, L	400	мм
Апертура, D_{ap}	150	мм

Заключение

На основании расчета динамики пучка был разработан проект канала транспортировки пучков низкой энергии (LEBT) и подготовлен комплект конструкторской документации (сборочного чертежа) на изготовление основных узлов канала.

Канал общей длиной 5,5 м состоит:

- из фокусирующего соленоида;
- транспортной линии типа s-shape, состоящего из поворотного и объединяющего магнитов и триплета квадрупольных линз между ними;

– прямолинейного участка, включающего триплет квадрупольных линз и соленоида, обеспечивающего согласованный аксиально-симметричный пучок на входе в ускоряющую структуру RFQ.

Динамические расчеты в канале LEBT проводились с использованием трехмерной карты магнитного поля элементов магнитной оптики: соленоида, квадрупольной линзы, поворотного и объединяющего магнитов. Разработанный канал позволяет расположить требуемое оборудование для диагностики пучка и вакуумной откачки ионопровода LEBT.

Минимизации роста поперечного эмиттанта в LEBT удалось достичь путем создания ахроматической структуры на участке отклонения пучка и снижения общего тока многокомпонентного пучка за счет усиленной фильтрации нецелевых фракций.

Список литературы

1. **Завьялов Н. В.** Исследовательские установки РФЯЦ – ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // *Успехи физических наук*. 2021. Т. 191. № 9.
2. **Будников Д. В. и др.** Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ – ВНИИТФ: настоящее и будущее // *ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов*. В 4. 2021. С. 5–25.
3. **Кулевой Т. В. и др.** Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
4. **Кильметова И. В. и др.,** Магнитные элементы низкоэнергетического канала для ускорителя тяжелых ионов // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
5. Spädtke Kobra3-INP Manual, September, 2005.
6. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015. P. 92–94.
7. PlotWin(CEA-SACLAY). URL: <http://irfu.cea.fr/en/Phoceas/Page/index.php?id=263> (дата обращения: 05.07.2021).
8. **Карпинский И. М.** Particle dynamics in linear resonance accelerators // *Atomizdat*. 1966. P. 274.

References

1. **Zavyalov N. V.** Research facilities of the RFNC-VNIIEF for the experimental acquisition of fundamental and applied knowledge in the field of nuclear, radiation physics and physics of fast processes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2021, vol. 191, no. 9. (in Russ.)
2. **Budnikov D. V. et al.** Nuclear and electrophysical installations of the RFNC-VNIITF: present and future. *VANT Series: physics of nuclear reactors*, B4, 2021, pp. 5–25. (in Russ.)
3. **Kulevoy T. V. et al.** Linear accelerator of heavy ions LU2 for the synchrotron research complex (SRC). *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print) (in Russ.)
4. **Kilmetova I. V. et al.** Magnetic elements of a low-energy channel for a heavy-ion accelerator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print) (in Russ.)
5. Spädtke Kobra3-INP Manual. September, 2005.
6. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code. *Proceedings of IPAC2015*, Richmond, VA, USA, pp. 92–94.
7. PlotWin(CEA-SACLAY). URL: <http://irfu.cea.fr/en/Phoceas/Page/index.php?id=263> (accessed on 05.07.2021).
8. **Карпинский И. М.** Particle dynamics in linear resonance accelerators. *Atomizdat*, 1966, p. 274. (in Russ.)

Сведения об авторах

Хабибуллина Екатерина Рамисовна, младший научный сотрудник

Кропачев Геннадий Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук, зам. руководителя ККТЭФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам»

Сергеева Ольга Сергеевна, инженер-программист

Кильметова Ирина Владиславовна, инженер

Скачков Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Борисков Александр Сергеевич, младший научный сотрудник

Гузов Максим Алексеевич, инженер-исследователь

Information about the Authors

Ekaterina R. Khabibullina, Junior Researcher

Gennady N., Kropachev, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Leading Researcher

Timur V. Kulevoy, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Head of KCTEP for applied scientific research and experimental installations

Olga S. Sergeeva, Software Engineer

Irina V. Kilmetova, Engineer

Vladimir S., Skachkov, Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Researcher

Alexander S. Boriskov, Junior Researcher

Maxim A. Guzov, Research Engineer

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 29.09.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 29.09.2023;
accepted for publication 05.03.2024*