

**УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

УДК 621.384.6

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В КАНАЛЕ LEVT
ТЯЖЕЛОИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ**

© 2023 г. Е. Р. Хабибуллина^а, *, Г. Н. Кропачёв^а, Т. В. Кулевой^а, О. С. Сергеева^а, В. С. Скачков^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: Ekaterina.Khabibullina@itep.ru

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 28.07.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

Канал транспортировки пучков низкой энергии LEVT предназначен для транспортировки пучков многозарядных ионов с A/Z от 4 до 8 (вплоть до $^{209}\text{Bi}^{27+}$) от лазерно-плазменного источника тяжелых ионов и форинжектора-экстрактора напряжением 70 кВ до начальной части линейного ускорителя. LEVT состоит из: транспортной линии, обеспечивающей сепарацию рабочей фракции ионного пучка, и участка согласования пучка с ускоряющей секцией RFQ. Расчет динамики ионного пучка широкого спектра по зарядности выполнен в трехмерной модели пространственного распределения поля магнитных элементов. В результате моделирования динамики частиц удалось обеспечить 4-мерное согласование ионов висмута с ускоряющей секцией RFQ при минимальном росте эмиттанса в LEVT.

Ключевые слова: линейный ускоритель ионов, ионный пучок, канал транспортировки пучка, моделирование динамики пучка

DOI: 10.56304/S2079562922050219

ВВЕДЕНИЕ

В Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа, который, например, может быть использован в качестве составной части синхротронного ускорителя, предназначенного для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства [1]. Линейный ускоритель ионов состоит из двух типов ускоряющих секций: RFQ (ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой) и DTL (ускоритель

с трубками дрейфа), состоящий из отдельных ускоряющих резонаторов и электромагнитных квадрупольных полей, расположенных между резонаторами. Канал транспортировки пучка низкой энергии LEVT должен обеспечить 4-мерное поперечное согласование рабочей фракции иона с ускоряющей структурой RFQ. Продольное согласование в канале RFQ обеспечивается адиабатическим группирователем. RFQ рассчитан на ток 3 мА ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$ с эмиттансом $2 \cdot \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ для 99% пучка. Импульсный разброс пучка на входе не должен превышать $\pm 0.5\%$. Основные параметры канала LEVT представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры ионного пучка и канала LEVT

Относительный заряд ионов, Z/A	1/4–1/8
Рабочая фракция пучка, Z (для висмута)	27 ⁺
Напряжение инжекции, кВ	70
Относительная скорость (β , для $^{209}\text{Bi}^{27+}$)	0.004334
Длина LEVT, м	До 7
Ток пучка: без компенсации пространственного заряда/с компенсацией 70%, мА	110/33
Апертура канала, мм	140 (100 – в поворотных магнитах)

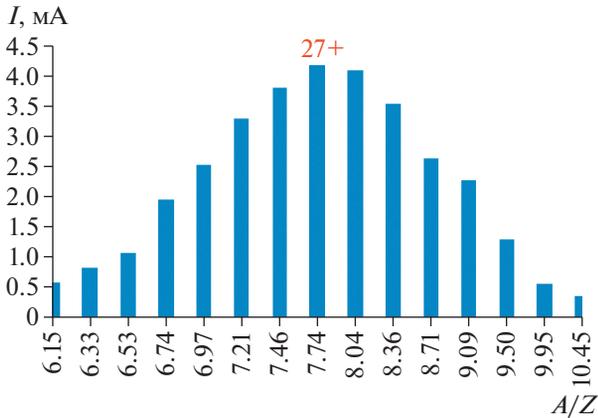


Рис. 1. Токовый спектр ионов $^{209}\text{Bi}^{20-34+}$ с учетом 70% компенсации пространственного заряда.

При разработке канала транспортировки пучка низкой энергии учитывались следующие требования:

- минимизация роста поперечного эмиттанса пучка в канале;
- обеспечение максимальной очистки основной фракции пучка от нецелевых компонент;
- компактность: общая длина канала не должна превышать 7 м; максимальное расстояние между плечом, на котором расположена система экстракции и плечом, где проходит ось ЛУ, составляет 2 м. Это ограничение связано с конструкцией лазерного источника и шириной ускорительного зала (9.5 м);

– необходимость установки вакуумной системы и системы диагностики пучка.

– использование схемы канала ЛЕВТ, состоящей из двух плеч и объединяющего устройства, для обеспечения последовательного (по времени) режима работы для разных типов ионов;

– возможность регулировки поперечных размеров и интенсивности пучка ионов, при инжекции в канал ЛЕВТ.

По предварительным оценкам общий ток пучка на выходе системы экстракции из лазерного ионного источника может составлять до 110 мА, что приведет к возникновению значительных по величине сил пространственного заряда, оказывающих дефокусирующее действие при транспортировке ионного пучка. При моделировании динамики пучка учитывалась частичная компенсация объемного заряда – 70% [2] за счет электронов плазмы, не полностью отфильтрованных на стадии экстракции. На рис. 1 представлен спектр ионов висмута на выходе системы экстракции при напряжении 70 кВ.

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЛЕВТ

Для сепарации ионных пучков в низкоэнергетических каналах зачастую используют две схемы расположения отклоняющих магнитов: арочного типа (англ. u-turn), при котором направление угла поворота в первом магните совпадает с направлением поворота во втором; и типа s-shape, в котором направления поворота противоположны друг другу. Ввиду имеющихся ограничений по размерам помещения ускорительного зала и конструк-

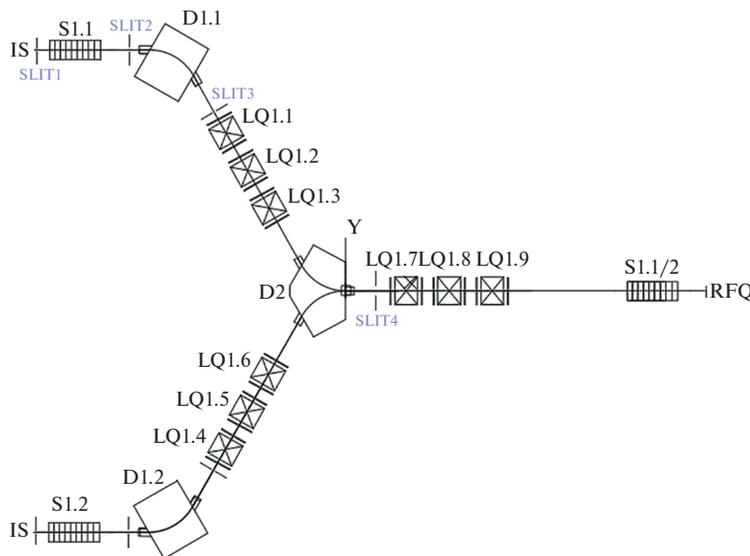


Рис. 2. Структурная схема ЛЕВТ: S1.1, S1.2, S1.1/2 – соленоиды; D1.1, D1.2 – поворотные магниты; D2 – объединяющий магнит; LQ1.1–LQ1.9 – квадрупольные электромагнитные линзы; IS – источник ионов; RFQ – ускоритель RFQ; SLIT1–4 – диафрагмы круглого и прямоугольного сечения.

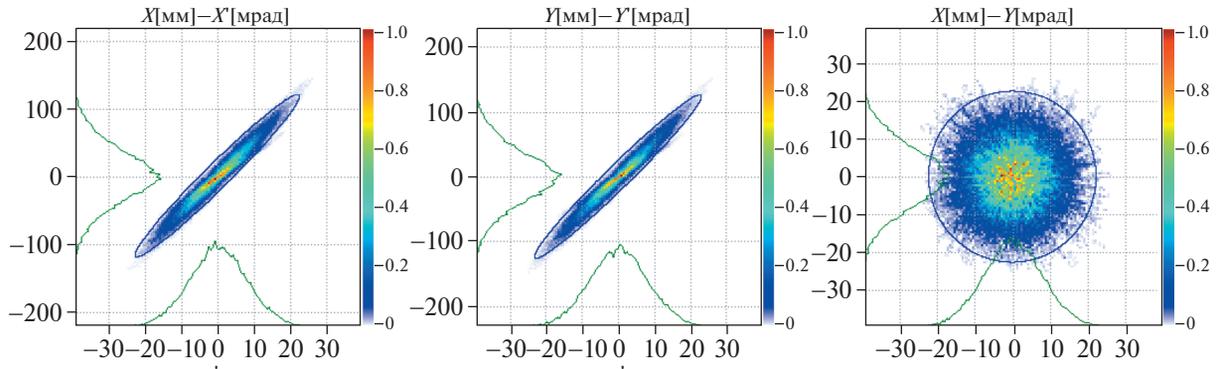


Рис. 3. Фазовый портрет пучка на выходе системы экстракции для спектра ионов $^{209}\text{Bi}^{20-34+}$.

ционных особенностей лазерного источника, выбрана магнитооптическая схема LEVT типа s-shape. Она представлена на рис. 2.

Основные участки канала:

1. Транспортная линия типа s-shape с использованием поворотных магнитов для сепарации рабочего сорта иона $^{209}\text{Bi}^{27+}$ от многокомпонентного пучка ионов висмута.
2. Прямолинейный участок, обеспечивающий согласование пучка с ускоряющей секцией RFQ.

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ПУЧКА НА УЧАСТКЕ СЕПАРАЦИИ В LEVT

Начальные параметры пучка на входе в LEVT соответствовали фазовым портретам пучка на выходе системы экстракции, рассчитанным в программе KOBRA3-INP [3] для спектра ^{209}Bi с $Z = 20-34$ (рис. 3, табл. 2). Импульсный разброс частиц для каждого типа ионов составлял $\pm 0.5\%$. Расчет динамики пучка проводился для нормального распределения частиц в 4-мерном фазовом пространстве. Представление фазовых портретов производилось с помощью программы визуализации PlotWin [4].

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

- возможность работы с пучком, содержащим различные типы ионов;
- учет объемной плотности заряда пучка при его транспортировке;
- использование трехмерных моделей пространственного распределения поля магнитных элементов.

В качестве первого оптического элемента канала LEVT был выбран соленоид S1.1. Его габаритная длина составляет 400 мм, магнитная апертура —

150 мм, величина магнитного поля на оси — 0.92 Тл (см. табл. 3). Более подробное описание параметров магнитных элементов приведено ниже в отдельной главе. Воздействуя продольным магнитным полем на аксиально-симметричный сильно-расходящийся пучок выходящий из системы экстракции, соленоид преобразует его в сходящийся с одинаковыми фазовыми портретами в поперечных плоскостях (рис. 4б).

Для контроля интенсивности и поперечных размеров пучка перед соленоидом расположена регулируемая диафрагма круглого сечения (рис. 4а). Обрезая пучок, она снижает общий ток пучка до 19.4 мА, в том числе, 2.5 мА — ионов рабочего сорта и эмиттанс до $0.16 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Это приводит к уменьшению роста эмиттанса на выходе соленоида с $3.5 (\approx 1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад})$ до 1.8 раз ($\approx 0.5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$) в сравнении с входным эмиттансом пучка.

Для размещения камеры с вакуумными насосами и диагностическим оборудованием между соленоидом и первым поворотным магнитом введен дрейфовый участок длиной 240 мм (рис. 4в). В конце этого дрейфа предусмотрена диафрагма круглого сечения, в которой происходит дополнительная сепарация пучка. Эмиттанс пучка за диафрагмой составляет $0.36 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ при токе 15.5 мА.

Сепарация рабочего сорта ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$ от нецелевых частиц происходит в s-образном ахроматическом канале. Это минимизирует рост эмиттанса

Таблица 2. Фазовые характеристики пучка на входе в LEVT

$\alpha_x = -4.64$	$\alpha_y = -4.93$
$\beta_x = 0.89 \text{ мм}/\pi \cdot \text{мрад}$	$\beta_y = 0.92 \text{ мм}/\pi \cdot \text{мрад}$
$\epsilon_{x\text{rms}} = 0.287 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y\text{rms}} = 0.287 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$
$\epsilon_{x99\%} = 2.51 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%} = 2.56 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$
$\epsilon_{x99\%}^{\text{норм}} = 579 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%}^{\text{норм}} = 590 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$

Таблица 3. Расчетные параметры фокусирующих элементов канала LEVT

СОЛЕНОИД	
Магнитная апертура, мм	∅150
Длина соленоида, мм	400
Обмотка, мм	∅150 × ∅240 × 400
Ярмо, мм	∅240 × ∅280 × 400
Ток × Плотность тока, А × А/мм ²	690 × 21
$B_{z\text{ center}} \times B_{\text{yoke}} \times \int Bdz$, Тл × Тл × Тл · м	1.01 × 1.7 × 0.41
Шинка медная (без канала охл.), мм ²	7.5 × 5 = 37.5
Электрические параметры соленоида, R × L × τ, мОм × мГ × мс	160 × 16 × 100
Питание соленоида: $I_{\text{nom}} \times U \times P$, А × В × кВт (DC)	690 × 110 × 75
КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА	
Магнитная апертура, мм	∅152
Длина $L_{\text{pole}} \times L_{\text{geom}} \times L_{\text{effect}}$, мм	180 × 232 × 242
Ток-на-полюс × Плотность тока, кА × А/мм ²	15 × 17
Поле: на полюсе × в сердечнике × в ярме, Тл	0.5 × 0.7 × 1.2
Градиент × Интеграл градиента $\int Gdz$ Тл/м × Тл	6.6 × 1.6
Схема катушки: Слоев × Витков в слое	4 × 5 = 20
Сечение провода (шинка без в. канала), мм	6.3 × 6.7
Линза: R × L × τ, мОм × мГн × мс	23 × 3 × 120
Питание: $I_{\text{nom}} \times U \times P$, А × В × кВт (DC)	750 × 17 × 13

са в плоскости поворота при транспортировке через поворотные магниты. Основные параметры дипольных магнитов D1.1 и D2 приведены в табл. 4.

Между поворотными магнитами (рис. 5а, 5в) расположен триплет квадрупольных линз LQ1.1–LQ1.3 с чередующимся дефокусирующим и фокусирующим действием (рис. 5б). Для уменьшения

расстояния между плечом LEVT и осью RFQ, в конструкцию электромагнитных квадрупольных линз введены шимы, которые укорачивают область краевого поля. В целях унификации все три линзы имеют единый типоразмер. Перед входом в триплет пучок ионов дополнительно сепарируется в плоскости поворота с помощью диафрагмы SLIT3 прямоугольного сечения (рис. 2). Траектории частиц, первоначально симметрично расходящиеся в вертикальной плоскости, достигают кроссовера вблизи центральной линзы квадрупольного триплета.

На расстоянии 100 мм от объединяющего магнита D2 расположена еще одна прямоугольная диафрагма SLIT4 (см. рис. 2), которая позволяет провести дополнительную сепарацию ионов. Полученный спектр ионов висмута на выходе SLIT4 представлен на рис. 6. Общий ток пучка после диафрагмы – 4 мА, в котором содержится 1.4 мА основного сорта ионов. Предполагается, что окончательная сепарация ионов висмута произойдет в магнитных элементах между ускоряющими секциями RFQ и DTL.

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ПУЧКА НА УЧАСТКЕ СОГЛАСОВАНИЯ С RFQ

Основные требования при разработке прямолинейного участка согласования пучка с RFQ:

- обеспечение 4-мерного согласования частиц с входными рассчитанными параметрами RFQ;
- унификация магнитных элементов в канале LEVT – использование подобных элементов, что и на участке сепарации;
- определение места размещения диагностического блока и вакуумного оборудования (≈700 мм);
- обеспечение места для установки монтажных элементов (соединительных фланцев, шибера, переходного монтажного патрубка и т.д.) перед RFQ (≈250 мм).

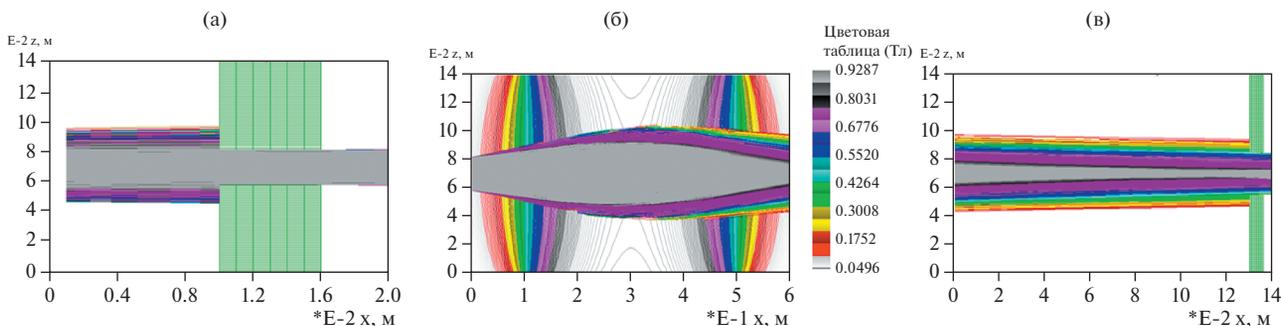


Рис. 4. Траектории движения пучка ионов ²⁰⁹Bi^{20–34+} в горизонтальной плоскости при прохождении: (а) первой диафрагмы SLIT1 круглого сечения; (б) соленоида S1.1; (в) второй диафрагмы SLIT2 круглого сечения в канале LEVT.

Таблица 4. Расчетные параметры отклоняющих элементов канала LEVT

ПОВОРОТНЫЙ МАГНИТ	
Угол поворота пучка	60°
Радиус поворота пучка, мм	400
Угол наклона средней линии к нормали в точках влета/вылета иона	30°/30°
Длина средней линии от точки влета и до вылета, мм	419
Межполюсный зазор, мм	108
Схема обмотки катушки: Слоев × Витков в слое	6 × 15 = 90
Сечение провода (шинка без канала охл.), мм	10 × 5
Плотность тока, А/мм ²	2.8
Поле: в центре зазора × в сердечнике × в ярме, Тл	0.24 × 0.4 × 1.6
Напряжение на обмотке при номинальном токе, В	14
Мощность рассеяния, кВт	1.6
ОБЪЕДИНЯЮЩИЙ МАГНИТ	
Угол поворота пучка	60°
Радиус поворота пучка, мм	400
Угол наклона средней линии к нормали в точках влета/вылета иона	30°/0°
Длина средней линии от точки влета и до вылета, мм	419
Межполюсный зазор, мм	108
Схема обмотки катушки: Слоев × Витков в слое	6 × 15 = 90
Сечение провода (шинка без канала охл.), мм	10 × 5
Плотность тока, А/мм ²	2.8
Поле: в центре зазора × в сердечнике × в ярме, Тл	0.26 × 0.5 × 1.4
Напряжение на обмотке при номинальном токе, В	14
Мощность рассеяния, кВт	1.6

Таблица 5. Фазовые характеристики пучка $^{209}\text{Bi}^{27+}$ на выходе канала LEVT

$\alpha_x = 0.9$	$\alpha_y = 0.9$
$\beta_x = 0.24 \text{ мм}/\pi\cdot\text{мрад}$	$\beta_y = 0.19 \text{ мм}/\pi\cdot\text{мрад}$
$\epsilon_{x\text{rms}} = 0.32 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	$\epsilon_{y\text{rms}} = 0.32 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$
$\epsilon_{x99\%} = 2.18 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%} = 2.49 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$
$\epsilon_{x99\%}^{\text{ненорм}} = 502 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%}^{\text{ненорм}} = 574 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$

С помощью программы TraceWin [5] проведено моделирование динамики пучка для ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$ при токе 4 мА, что соответствует току пучка всего спектра висмута и позволяет учитывать эффект кулоновских сил. Графическое представление результатов моделирования осуществлялось в программе PlotWin [3].

Для регулировки пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях в качестве первого оптического элемента прямолинейного участка был выбран триплет квадрупольных линз с шимами, аналогичный триплету между поворотными магнитами.

Для обеспечения аксиально-симметричного пучка на входе в RFQ в качестве фокусирующего элемента используется соленоид. При этом необходимое поле на оси соленоида для фокусировки не превышает 0.62 Тл.

Распределение плотности пучка в канале LEVT приведено на рис. 7.

Фазовые портреты и характеристики пучка на выходе LEVT при токе 4 мА для ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$ представлены на рис. 8 и в табл. 5.

Полученные нормализованные среднеквадратичные поперечные эмиттансы ($0.32 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$) отличаются от требуемых значений на входе RFQ ($0.25 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$) в 1.3 раза. Это связано с неизбежным ростом поперечного эмиттанса за счет кулоновских эффектов и нелинейных полей фокусирующих элементов в канале. Входные параметры пучка в RFQ рассчитывались согласно формулам И.М. Капчинского [6], где отношение нормализованного аксептанса к нормализованному входному эмиттансу равно 3 ($V_k/\epsilon_{\text{minp}} = 3$). Полученные значения поперечного эмиттанса в LEVT далеки от критических, что позволяет ускорять пучок в RFQ без потерь.

Как видно из рис. 8, импульсный разброс пучка сохраняется на уровне $\pm 0.5\%$, что удовлетворяет входным требованиям RFQ.

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАНАЛА LEVT

С помощью программы CST EM Studio [7] были смоделированы конструкции магнитных элементов канала LEVT, обеспечивающие требуемые параметры и проведены расчеты распределения поля в них (рис. 9, 10). Основные параметры элементов транспортировки приведены в табл. 3 и 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования динамики пучка был разработан канал транспортировки пучков низкой энергии LEVT линейного ускорителя.

Общая длина LEVT составляет 5.4 м. Канал состоит из:

– соленоида;

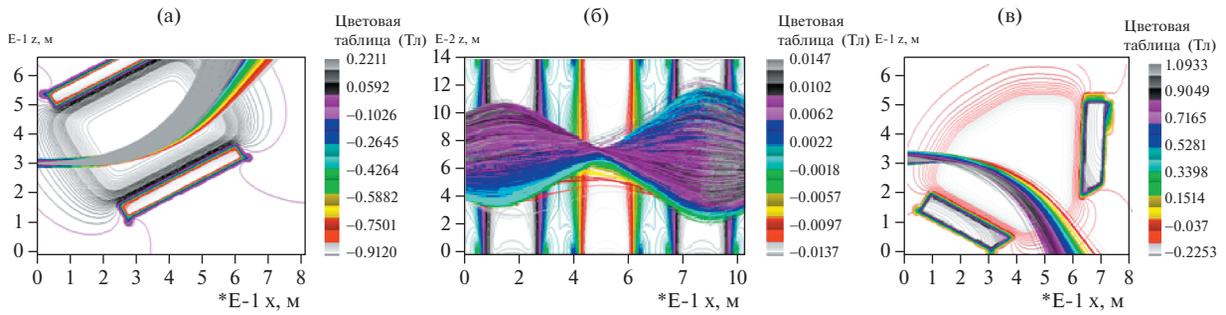


Рис. 5. Траектории движения пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{20-34+}$ в горизонтальной плоскости при прохождении (а) поворотного магнита D1.1; (б) триплета квадрупольных линз LQ1.1–LQ1.3; (в) второго поворотного магнита D2 в канале LEVT.

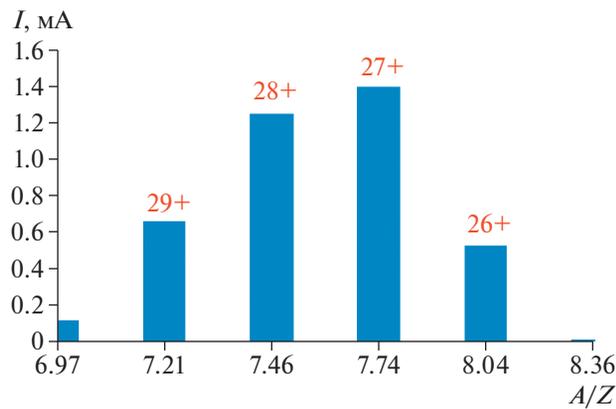


Рис. 6. Спектр пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{26-30+}$ после прохождения диафрагмы SLIT4.

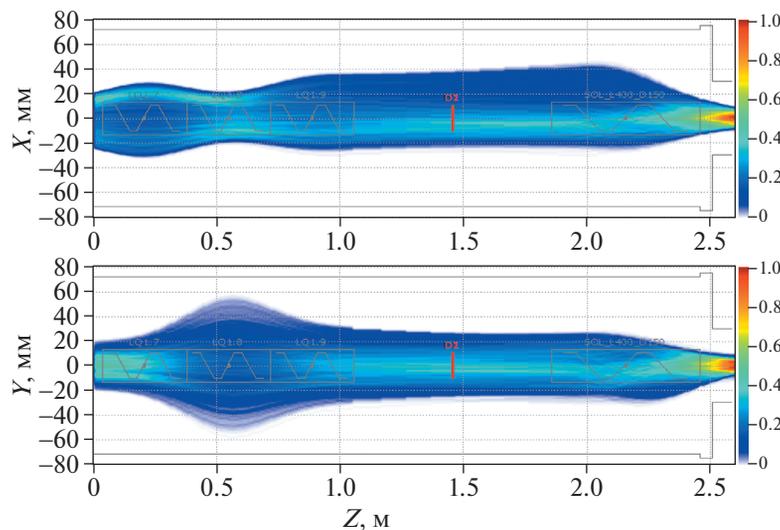


Рис. 7. Распределение плотности пучка на участке согласования в LEVT.

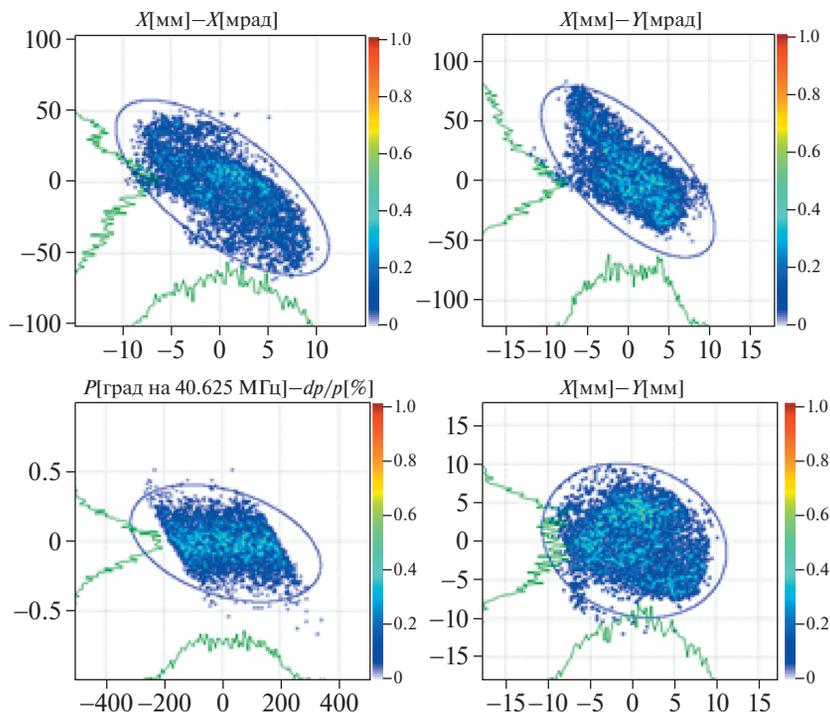


Рис. 8. Фазовые портреты пучка на выходе канала LEVT пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$.

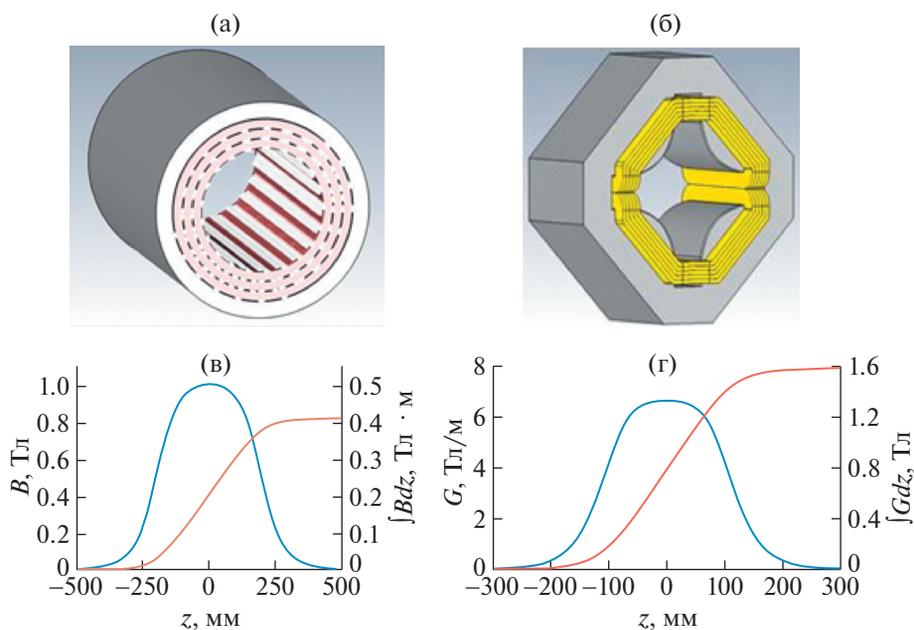


Рис. 9. Магнитные элементы LEVT: (а) соленоид, (б) квадрупольная линза, а также продольные распределения: (в) поля и интеграла поля вдоль оптической оси соленоида и (г) градиента и интеграла градиента квадрупольной линзы.

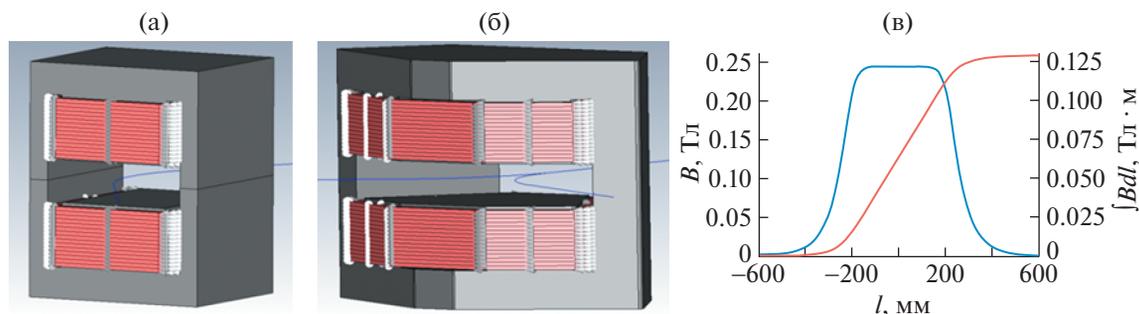


Рис. 10. Система поворотных магнитов LEVT: (а) отклоняющий магнит, (б) объединяющий магнит, а также (в) продольное распределение поля и интеграла.

– транспортной линии типа s-shape с использованием двух 60° поворотных магнитов и триплета квадрупольных линз между ними;

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

Для проведения динамических расчетов в LEVT с использованием трехмерной карты магнитного поля были разработаны конструкции элементов магнитной оптики: соленоида, квадрупольной линзы, поворотного и объединяющего магнитов. Канал транспортировки позволяет расположить требуемое оборудование для диагностики пучка и вакуумной откачки ионопровода LEVT.

Использование триплета квадрупольных линз и соленоида позволило получить согласованные параметры пучка в точке передачи с RFQ. Умень-

шение роста поперечного эмиттанта в LEVT удалось достичь путем снижения общего тока многозарядных частиц в канале за счет эффективной сепарации пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Будников Д.В. и др. // ВАНТ. Сер.: физика ядерных реакторов. 2021. Т. 4. С. 5–25.
2. Yang Y. et al. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22 (11). P. 110101.
3. Spädtke P. Kobra3-INP Manual. Version 4.44. 2005.
4. Uriot D. et al. PlotWin. 2014. Paris: CEA.
5. Uriot D. et al. // Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'15). 2015. P. 92–94.
6. Канчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. 1966. Москва: Атомиздат.
7. CST Studio Suite. <https://software.cstechnology.ru>.

Beam Dynamics Simulation of the LEVT for the Heavy-Ion Linear Accelerator

E. R. Khabibullina¹, *, G. N. Kropachev¹, T. V. Kulevoy¹, O. S. Sergeyeva¹, and V. S. Skachkov¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: Ekaterina.Khabibullina@itep.ru

Received July 28, 2022; revised July 28, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—The LEVT channel is designed for transporting beams of multiply charged ions with A/Z from 4 to 8 (up to $^{209}\text{Bi}^{27+}$) from a laser source of heavy ions and 70 kV extractor system to the initial part of the linear accelerator. The LEVT consists of: the transport line for separation of the main ion beam, and the section for beam matching with the accelerating section RFQ. Beam dynamic simulation was carried out taking into account fields three-dimensional distributions of the magnetic elements. As a result of the simulation of particle dynamics, it was possible to provide the 4-dimensional matching of $^{209}\text{Bi}^{27+}$ with the RFQ, with a minimum emittance increasing in the LEVT.

Keywords: linear ion accelerator, ion beam, beam transport channel, simulation of beam dynamics