

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.01

РАЗРАБОТКА МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ (НЕВТ) ТЯЖЕЛОИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

© 2022 г. Е. Р. Хабибуллина^а, *, В. И. Николаев^а, А. Е. Большаков^а, В. С. Скачков^а,
Г. Н. Кропачёв^а, Т. В. Кулевой^а

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

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

Поступила в редакцию 30.12.2021 г.

После доработки 30.12.2021 г.

Принята к публикации 12.01.2022 г.

Канал НЕВТ (канал транспортировки тяжелых ионов высокой энергии) предназначен для транспортировки пучков ионов с $Z/A = 1/4–1/8$ и энергией 4 МэВ/нуклон от линейного ускорителя (ЛУ) до обдирочной мишени и подготовки кинематических характеристик пучка к инъекции в бустер. Канал состоит из магнитных квадрупольных линз, обеспечивающих поперечную фокусировку пучка и дебанчера, введенного для снижения разброса частиц в пучке по импульсу до $\pm 0.3\%$. Моделирование динамики пучка в НЕВТ проводилось с учетом трехмерного распределения магнитных полей в квадрупольных линзах и электрических полей в дебанчере.

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

DOI: 10.56304/S2079562922030204

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически любой крупный ускорительно-накопительный комплекс можно схематично представить следующим образом: источник заряженных частиц; линейный ускоритель-инжектор; бустерный ускоритель; основной ускоритель; экспериментальные установки.

Все вышеперечисленные части ускорительного комплекса соединяются друг с другом каналами, по которым заряженные частицы переводятся из одной структуры в другую. При проектировании канала транспортировки пучка заряженных частиц необходимо учитывать целый ряд существенных факторов: энергию, которой будут обладать частицы, подлежащие транспортировке по каналу; относительный заряд транспортируемых ионов Z/A ; интенсивность пучка ускоряемых ионов; частоту повторения для ускорителей импульсного действия; внутреннюю структуру пучка, предоставляющую возможность уменьшения разброса частиц в пучке по фазе или импульсу.

В предлагаемой статье рассмотрен проект канала транспортировки ионов из линейного ускорителя-инжектора в бустер-канал НЕВТ. Главные требования, выдвигаемые при разработке канала транспортировки НЕВТ — минимизация роста эмиттанса пучка и потерь частиц, а также

обеспечение импульсного разброса частиц в пучке не выше, чем $\Delta p/p = \pm 0.5\%$.

В качестве ускорителя-инжектора взята перспективная разработка линейного ускорителя ионов с энергией 4 МэВ/нуклон, выполненная в ИТЭФ. Основные параметры пучка в НЕВТ представлены в табл. 1.

Длина канала транспортировки 20.4 м обусловлена необходимостью установки дополнительного оборудования для: наблюдения за пучком и корректировкой положения пучка в канале; сведения пучков, ускоренных в разных инжекторах, в единый канал транспортировки; установки биологической защитной стены для проведения независимых технических работ в помещениях ЛУ и бустера.

Таблица 1. Основные параметры пучка ЛУ в канале транспортировки

Относительный заряд ионов, Z/A	1/4–1/8
Энергия на выходе ЛУ, МэВ/нуклон	4
Относительная скорость	0.0925
Длина НЕВТ, м	20.4
Ток пучка, мА	10

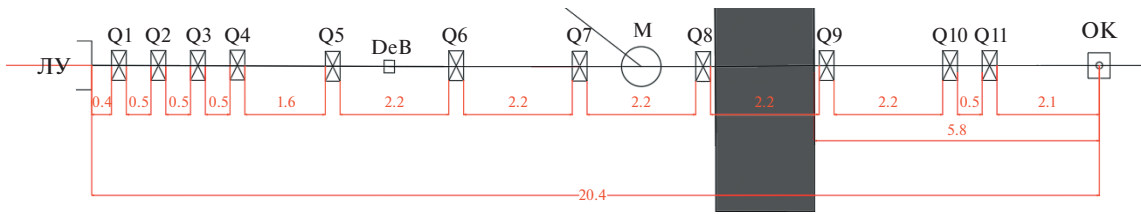


Рис. 1. Схема канала транспортировки ионов НЕВТ (ЛУ – линейный ускоритель тяжелых ионов; Q1–Q11 – магнитные квадрупольные линзы; M – дипольный магнит; DeB – дебанчер; ОК – камера обдирки ионов; серым цветом обозначена защитная стена).

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СХЕМА НЕВТ

При проектировании канала транспортировки использовался опыт разработки кольцевых ускорителей. Магнитная структура кольцевого ускорителя состоит из дипольных поворотных магнитов и периодически расположенных квадрупольных линз. Именно принцип периодичности расположения магнитных элементов был применен при проектировании основного участка канала транспортировки пучка НЕВТ. Так как в нашем случае движение заряженных частиц на участке ЛУ–обдирочная мишень происходит по прямой, дипольные поворотные магниты в канале не требуются, и магнитооптическая система состоит только из квадрупольных линз. В качестве периодической системы фокусировки пучка была выбрана схема **ФОДО**, построенная из квадрупольных линз одинаковой конструкции. Наличие участка с периодической структурой позволяет создавать канал практически произвольной длины с кратностью до половины периода фокусировки. В начале и в конце канала от четырех до пяти квадрупольных линз будут использоваться для согласования фазовых характеристик пучка на выходе из линейного ускорителя и на входе в бустер со средним участком канала.

Таким образом, магнитооптическая структура канала НЕВТ, состоит из трех самостоятельных участков (рис. 1):

- “Периодический” участок (Q5–Q9). На входе в каждый период участка расчетные параметры Твисса повторяются;

- Начальный участок (Q1–Q4) обеспечивает согласование параметров Твисса на выходе из ЛУ с параметрами Твисса на входе в “периодический” участок;

- Участок формирования (Q10–Q11), в данном варианте, используется для фокусировки пучка на обдирочную мишень. Вполне вероятно, что для увеличения возможностей фокусировки, к линзам Q10 и Q11 будет добавлена квадрупольная линза Q12.

Дипольный магнит M, расположенный между линзами Q7 и Q8, служит для перевода в канал НЕВТ пучка легких ионов из другого ускорителя-инжектора [1].

Толщина биологической защитной стены между помещениями бустера и линейных ускорителей может варьироваться в пределах 1–2 м, поэтому расстояние между центрами ближайших электромагнитных линз “периодического” участка выбрано равным 2500 мм, эффективная длина квадрупольной линзы – 300 мм, магнитная апертура – 100 мм.

АМПЛИТУДНАЯ β -ФУНКЦИЯ И ОГИБАЮЩИЕ ПУЧКА В КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Начальные параметры пучка на входе в канал транспортировки НЕВТ соответствовали рассчитанным фазовым портретам пучка на выходе ускоряющей структуры ЛУ для $Z/A = 1/8$ с энергией 4 МэВ/нуклон. Моделирование динамики пучка в канале проводилось в программах MAD-X

Таблица 2. Фазовые характеристики пучка на входе в НЕВТ

$\alpha_x = 0.856$	$\alpha_y = -3.05$	$\alpha_z = 0.0431$
$\beta_x = 0.6 \text{ мм/}\pi \cdot \text{мрад}$	$\beta_y = 2.343 \text{ мм/}\pi \cdot \text{мрад}$	$\beta_z = 35.644 \text{ град/}\pi \cdot \%$
$\epsilon_{x\text{rms}} = 0.2971 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y\text{rms}} = 0.291 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{z\text{rms}} = 0.1451 \pi \cdot \text{град} \cdot \%$
$\epsilon_{x99\%} = 3.085 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%} = 2.902 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{z99\%} = 1.4314 \pi \cdot \text{град} \cdot \%$
$\epsilon_{x99\%}^{\text{норм}} = 33.35 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%}^{\text{норм}} = 31.37 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{z99\%}^{\text{норм}} = 15.474 \pi \cdot \text{град} \cdot \%$

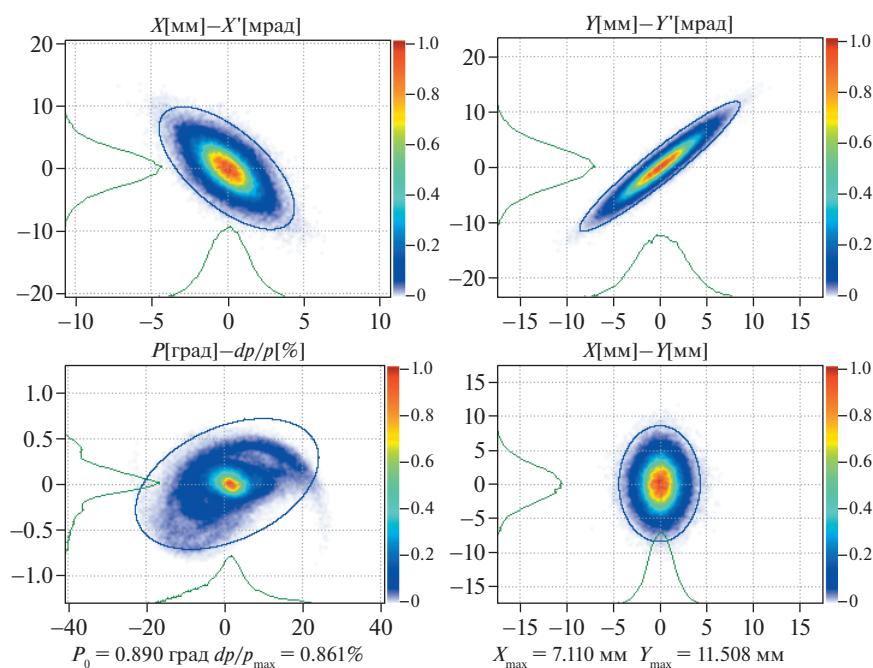
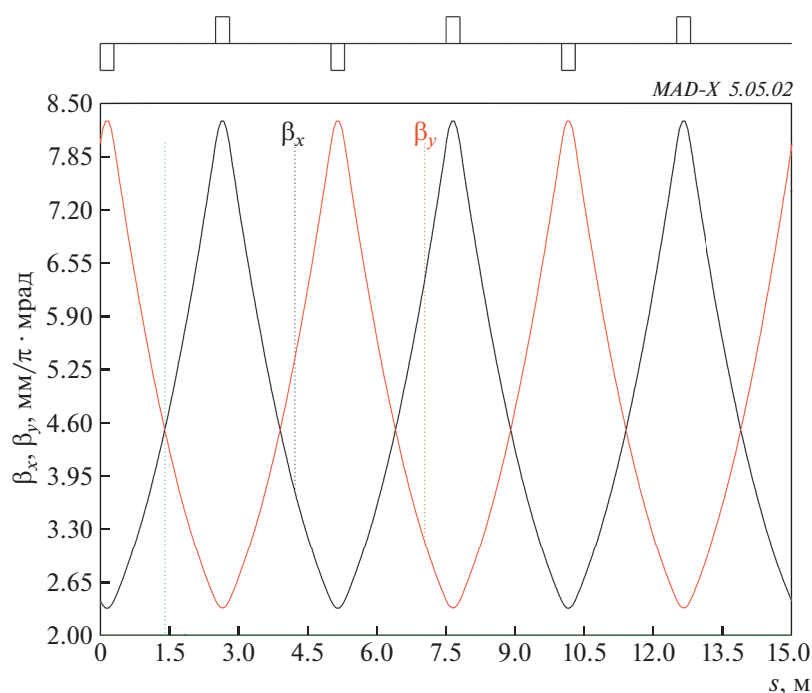


Рис. 2. Фазовые портреты пучка на входе в НЕВТ.

Рис. 3. Расчетные значения функций β_x и β_y на “периодическом” участке канала транспортировки.

[2] и TraceWin [3] с визуализацией в PlotWin [4] при начальном токе 10 мА (рис. 2, табл. 2).

Магнитная оптика канала НЕВТ рассчитывалась, начиная с периодического участка. Для выбранных значений длин линз по градиенту и рас-

стояний между центрами линз с помощью программы MAD-X были рассчитаны значения амплитудных функций β_x и β_y для “периодического” участка канала, при этом помимо условия периодичности накладывалось требование минимизации значений β -функций. Результаты расчета

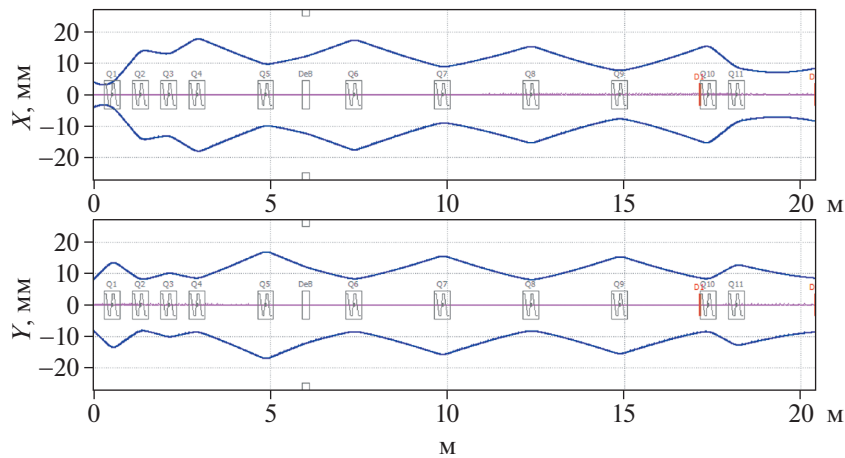


Рис. 4. Огибающие пучка в канале транспортировки НЕВТ.

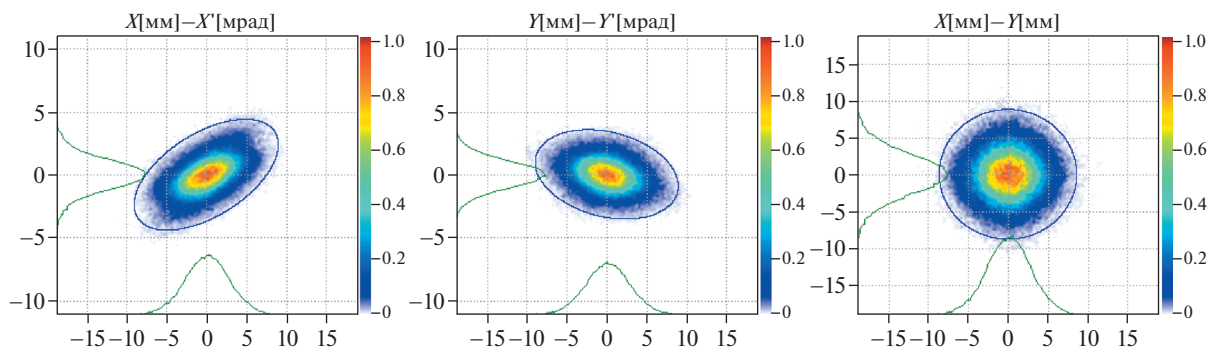


Рис. 5. Фазовые портреты пучка на мишени по обдирке ионов.

β -функций представлены на рис. 3. По результатам данного расчета были определены значение градиента магнитной индукции в каждой линзе.

На следующем этапе выполнялось согласование параметров пучка, полученного на выходе из ЛУ (рис. 2), с расчетными значениями β -функ-

ций “периодической” части НЕВТ. Для согласования использовались линзы Q1–Q4 начального участка канала транспортировки.

С помощью рассчитанного пространственного распределения магнитного поля в квадрупольной линзе были определены значения фазовых характеристик пучка для заданного эмиттанта пучка и для эмиттанта $100 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, равному расчетному аксептансу канала ЛУ. В результате был выбран внутренний диаметр вакуумной камеры канала 80 мм. Выбранная величина магнитной апертуры линзы 100 мм обеспечивает размещение поверх вакуумной камеры, толщиной стенки 2 мм, нагревательного элемента и термоизоляции, а также юстировку поперечного положения магнитной оси линзы.

Огибающие пучка в канале транспортировки НЕВТ и фазовые портреты пучка на обдирочной мишени приведены на рис. 4 и 5.

В результате моделирования динамики пучка были скорректированы градиенты магнитного поля электромагнитных квадрупольных линз (см. табл. 3).

Таблица 3. Градиенты магнитного поля квадрупольных линз НЕВТ

Элемент	Градиент, Тл/м
Q1	–11.65
Q2	9.26
Q3	–4.98
Q4	5.26
Q5	–4.61
Q6	3.79
Q7	–3.79
Q8	3.79
Q9	–3.79
Q10	6.95
Q11	–5.72

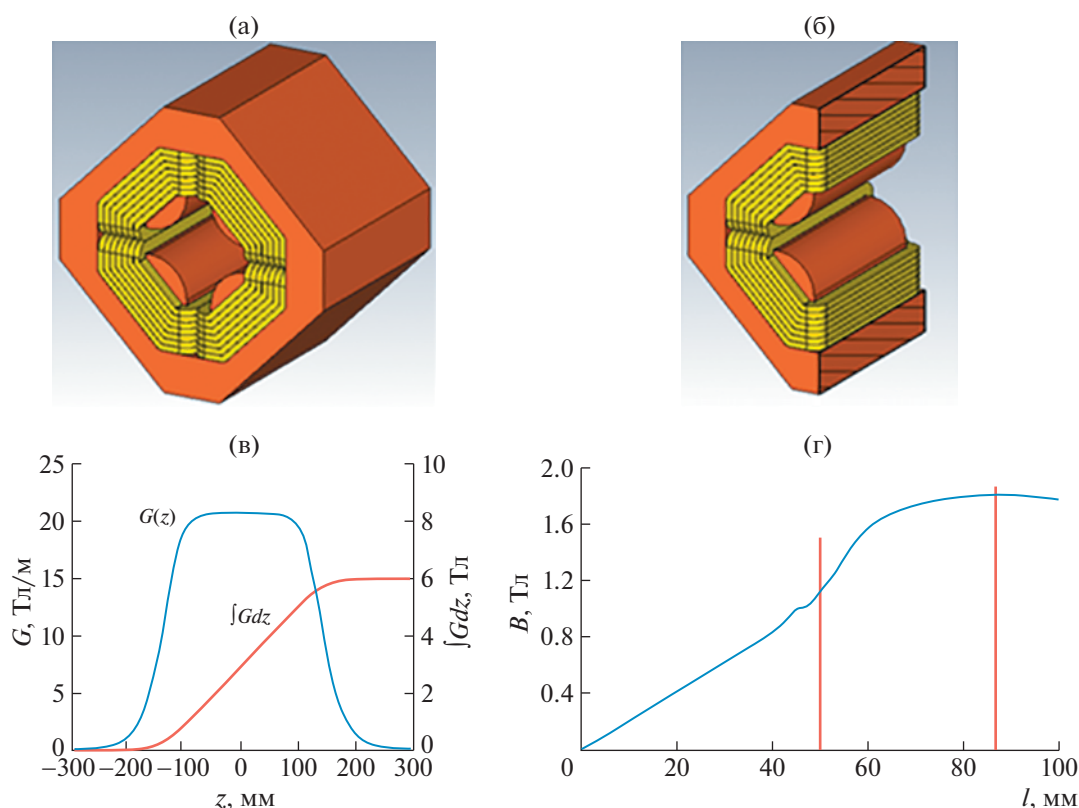


Рис. 6. Электромагнитная квадрупольная линза для НЕВТ: (а) внешний вид линзы, (б) ее съемная часть, (в) продольное распределение градиента и интеграла градиента и (г) распределение поля на биссектрисе полюса.

КВАДРУПОЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЛИНЗА НЕВТ

С помощью программы CST EM Studio [5] была смоделирована конструкция магнитной квадрупольной линзы, обеспечивающая максимальный градиент магнитного поля 21 Тл/м при индукции магнитного поля на полюсе 1 Тл (материал Steel-1010 — электротехническая низкоуглеродистая сталь) и проведен расчет распределения поля в ней (рис. 6). Основные параметры квадрупольной линзы приведены в табл. 4.

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗБРОСА ПО ИМПУЛЬСУ ЧАСТИЦ В ПУЧКЕ ИОНОВ, УСКОРЕННЫХ В ЛУ

Для уменьшения разброса по импульсу в пучке ионов, ускоренных в ЛУ, в канале транспортировки предусмотрена установка дебанчера.

Согласно входным данным (рис. 2) на выходе из ЛУ разброс по импульсу составляет $dp/p = \pm 0.8\%$. В качестве дебанчера рассматривались две конструкции резонаторов — на частоту 162.5 МГц (соответствует частоте ЛУ) и 81.25 МГц.

Таблица 4. Параметры квадрупольной импульсной линзы НЕВТ

Диаметр магнитной апертуры, мм	100
Длина $L_{\text{pole}} \times L_{\text{geom}} \times L_{\text{effect}}$, мм	$250 \times 288 \times 286$
Ток-на-полюс $\times$ Плотность тока, кА $\cdot$ А/мм ²	21×18
Поле: на полюсе — в сердечнике — в ярме, Тл	$1.0 - 1.8 - 1.9$
Градиент $\times$ Интеграл градиента $\int Gdz$, Тл/м $\cdot$ Тл	21×6.0
Схема обмотки, витков $\times$ слоев на полюс	7×2
Сечение провода (шинка без в. канала), мм	9×9
Линза: $R \times L \times \tau$, мОм $\cdot$ мГн $\cdot$ мс	$9 \times 2.2 \times 240$
Питание: $I_{\text{ном}} \times U \times P$, А $\cdot$ В $\cdot$ кВт	$1500 \times 14 \times 20$
Габариты линзы: (xyz), мм	$412 \times 412 \times 288$

Таблица 5. Основные параметры дебанчера в канале транспортировки

Частота, МГц	162.5
Внутренний радиус трубок дрейфа, мм	25
Внешний радиус трубок дрейфа, мм	45
Длина зазора, мм	30
Длина 1-й трубки дрейфа, мм	28
Длина 2-й трубки дрейфа, мм	55
Длина 3-й трубки дрейфа, мм	28
Радиус скругления трубки дрейфа, мм	5
Максимальное напряжение на зазоре, кВ	226
Максимальная напряженность поля в зазоре, МВ/м	4.65
Максимальная напряженность поля на поверхности, МВ/м	17.5

Таблица 6. Фазовые характеристики пучка на выходе НЕВТ

$\alpha_x = -0.6464$	$\alpha_y = 0.2735$	$\alpha_z = 1.151$
$\beta_x = 2.435 \text{ мм/}\pi \cdot \text{мрад}$	$\beta_y = 2.612 \text{ мм/}\pi \cdot \text{мрад}$	$\beta_z = 817.45 \text{ град/}\pi \cdot \%$
$\epsilon_{x\text{rms}} = 0.3014 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y\text{rms}} = 0.291 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{z\text{rms}} = 0.1542 \pi \cdot \text{град} \cdot \%$
$\epsilon_{x99\%} = 3.1063 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%} = 2.8561 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{z99\%} = 1.89 \pi \cdot \text{град} \cdot \%$
$\epsilon_{x99\%}^{\text{ненорм}} = 33.58 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{y99\%}^{\text{ненорм}} = 30.87 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\epsilon_{z99\%}^{\text{ненорм}} = 20.43 \pi \cdot \text{град} \cdot \%$

Поскольку фазовая протяженность сгустка ускоренных ионов не важна при инъекции пучка в бустер, был выбран двухзазорный резонатор, работающий на частоте 162.5 МГц, как более компактный и простой в изготовлении. Ос-

новные параметры дебанчера представлены в табл. 5. Распределение поля в дебанчере показано на рис. 7. Внутренний радиус трубок дрейфа дебанчера составляет 25 мм, внешний – 45 мм, что позволяет транспортировать пучок с эмиттансом, равным аксептансу ЛУ (100 $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$), без потерь.

Выполнена оценка влияния дебанчера на импульсный разброс ионов в пучке (рис. 8, 9). Согласно результатам моделирования, разброс ионов по импульсу после дебанчера можно уменьшить с $\pm 0.8\%$ (рис. 8а) до $\pm 0.3\%$ (рис. 8б). В канале транспортировки после дебанчера разброс по импульсу сохраняется. Увеличивается протяженность сгустка по фазам (рис. 8в), что не является критичным.

Выходные параметры пучка в канале НЕВТ представлены в табл. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование динамики пучка в канале транспортировки ионов (НЕВТ).

Были определены основные параметры квадрупольной линзы канала: максимальный градиент магнитного поля в линзе на участке согласования – 11.7 Тл/м (для Q1), для “периодического”

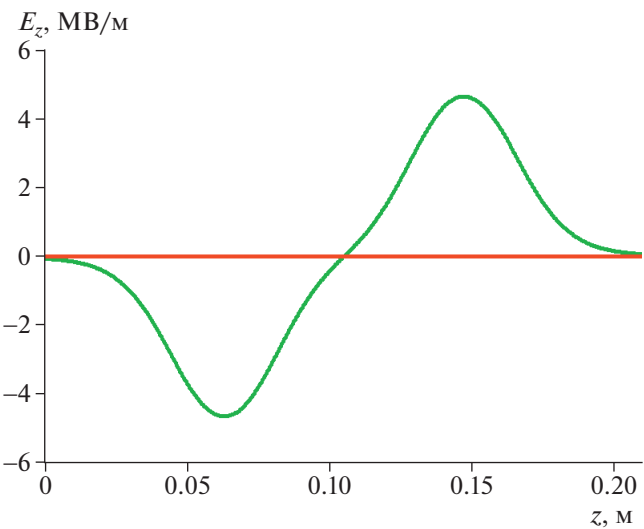


Рис. 7. Распределение электрического поля вдоль оси дебанчера.

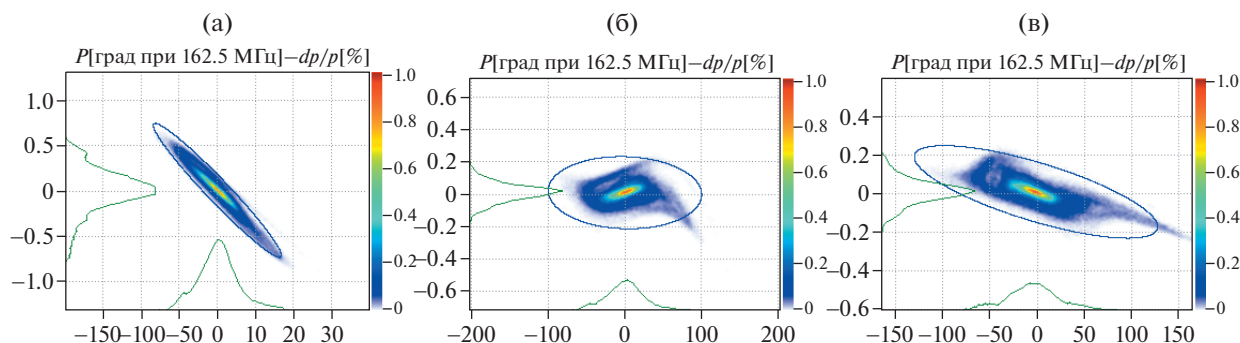


Рис. 8. Продольные характеристики пучка: (а) перед дебанчером; (б) после дебанчера; (в) на обдирочной мишени.

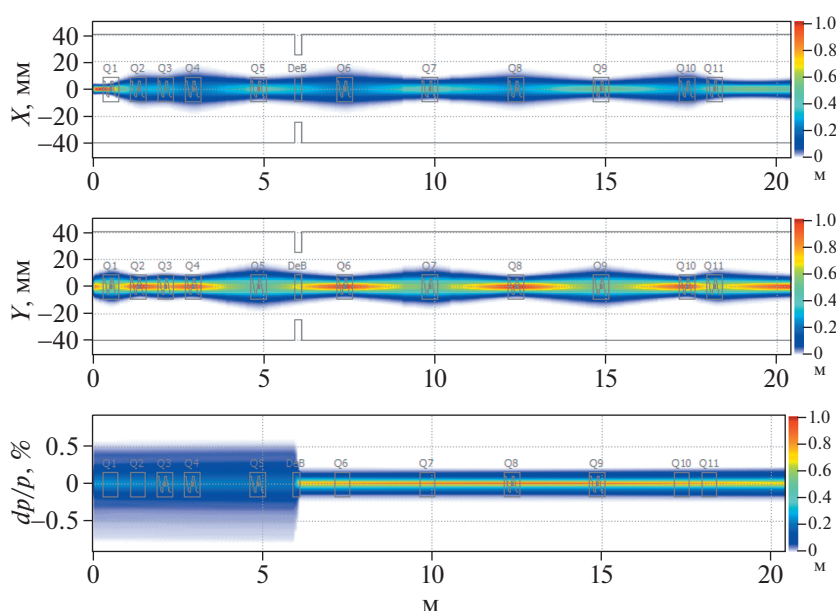


Рис. 9. Распределение плотности пучка в канале транспортировки с использованием двухзачорного дебанчера.

участка — 3.8 Тл/м; эффективная длина линзы — 286 мм. Конструкция линзы предполагает запас по увеличению градиента линзы до 21 Тл/м (около 40%).

Для перевода пучка ионов, ускоренных в другом инжекторе, между квадрупольными линзами Q7 и Q8 предусмотрено место для установки дипольного магнита (ахроматической транспортной линии).

Для уменьшения импульсного разброса пучка на входе в обдирочную мишень были определены место размещения и основные параметры двухзачорного дебанчера: частота — 162.5 МГц, максимальная напряженность поля 4.65 МВ/м на зазоре, 17.5 МВ/м на поверхности. Внутренний радиус трубок дрейфа дебанчера составляет 25 мм, внешний — 45 мм, что позволяет транспортиро-

вать пучок с эмиттансом равным акцептансу ЛУ (100 π мм мрад). Дебанчер может обеспечить уменьшение импульсного разброса пучка с ± 0.8 до $\pm 0.3\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kotov V.I., Miller V.V. Focusing and Mass Separation of High-Energy Particles. 1969. Moscow: Atomizdat (in Russian).
2. Skowronski P.K. Proc. IPAC. 2009. P. 117–121.
3. Uriot D. et al. Proc. IPAC. 2015. P. 92–94.
4. Uriot D. et al. PlotWin. 2014. Saclay: CEA.
5. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/student-edition>.

The Development of the HEBT Magneto-Optical Scheme for Heavy ion LINAC

E. R. Khabibullina^{1, *}, V. I. Nikolaev¹, A. E. Bolshakov¹, V. S. Skachkov¹,
G. N. Kropachev¹, and T. V. Kulevoy¹

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

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

Received December 30, 2021; revised December 30, 2021; accepted January 12, 2022

Abstract—The HEBT channel is designed for transportation of 4 MeV/u energy ion beams with $Z/A = 1/4$ – $1/8$ from linac to stripping target to prepare the beam for injection into the booster. The channel consists of magnetic quadrupole lenses providing transverse focusing of the beam and the debuncher to reduce the particles momentum spread to $\pm 0.3\%$. Beam dynamic simulation was carried out taking into account three-dimensional distributions of the quadrupole lenses magnetic fields and electric fields of the debuncher.

Keywords: linac, ion beam, beam transport channel, beam dynamics simulation