

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ БЕЗДИСПЕРСННЫЙ ПОВОРОТНЫЙ КАНАЛ ИОНОВ УРАНА ДЛЯ ПРОЕКТА DERICA

© 2020 г. В. С. Дюбков^a, *, В. Ю. Механикова^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: VSDyubkov@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 29.06.2020 г.

Принята к публикации 29.06.2020 г.

Представлены результаты моделирования динамики пучка ионов урана $^{238}\text{U}^{60+}$ в поворотном магнитооптическом канале, расположенном между двумя сверхпроводящими секциями линейного ускорителя-драйвера LINAC-100 нового проекта по изучению радиоактивных изотопов DERICA (ОИЯИ, Дубна). Предложена схема поворотного канала и выбраны параметры его магнитных элементов, обеспечивающих нулевые значения дисперсионных функций в начале и конце канала транспортировки пучка ионов урана с энергией 50 МэВ/нуклон.

Ключевые слова: ускорители, магнитный канал, транспортировка, радиоактивные изотопы, DERICA

DOI: 10.1134/S2079562920010017

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений ядерной физики низких энергий является изучение радиоактивных изотопов. К настоящему времени не найдена граница ядерной стабильности на большей части карты нуклидов. Для поиска этой границы и решения других фундаментальных проблем, таких как: измерение зарядовых форм-факторов радиоактивных изотопов; изучение структуры и радиоактивных распадов экзотических ядер и резонансов; получение тяжелых ядер; изучение барьеров деления и атомно-физические исследования с почти полностью ободранными ионами, на базе Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) разрабатывается проект перспективного ускорительно-накопительного комплекса международного мегапроекта Dubna Electron-Radioactive Ion Collider Facility (DERICA) [1]. Отметим, что сегодня в мире действует, строится и разрабатывается несколько подобных установок, среди которых SPES (INFN, Италия) [2], Spiral2 (GANIL, Франция) [3], FRIB (Мичиганский университет, США) [4], RISP (Корея) [5], ISAC-II (TRIUMF, Канада) [6].

Разработка и создание международного исследовательского комплекса DERICA ОИЯИ предполагает создание сложной и дорогостоящей установки — ускорителя-драйвера непрерывного режима LINAC-100, предназначенного для ускорения тяжелых ионов в широком диапазоне отно-

шений массы ионов к их зарядности A/Z до энергии на выходе не менее 100 МэВ/нуклон для тяжелых ионов вплоть до урана [7].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА УРАНА С $A/Z = 4$ В МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ПОВОРОТНОМ КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ УСКОРИТЕЛЯ- ДРАЙВЕРА LINAC-100

В соответствии с текущим проектом комплекса DERICA (рис. 1) сверхпроводящий линейный ускоритель LINAC-100 на энергию ионов 100 МэВ/нуклон, работающий на частоте 325 МГц, состоит из двух частей: начальной, предназначенной для ускорения ионов с энергией от 6–20 МэВ/нуклон до энергии 50 МэВ/нуклон, и конечной, предназначенной для ускорения ионов с энергией 50 МэВ/нуклон до энергии 100 МэВ/нуклон.

Из рис. 1 видно, что для перевода ускоряемых ионов из первой секции во вторую, необходим поворотный канал (I). Одним из требований, предъявляемых к такому каналу транспортировки, является нулевое значение дисперсионных функций на выходе из канала, что повышает эффективность инжекции во вторую секцию ускорителя-драйвера LINAC-100.

Для этой цели предложено использовать ионно-оптический канал, являющийся линейным ахроматом, который состоит из набора квадрупольных линз и дипольных магнитов. В свою

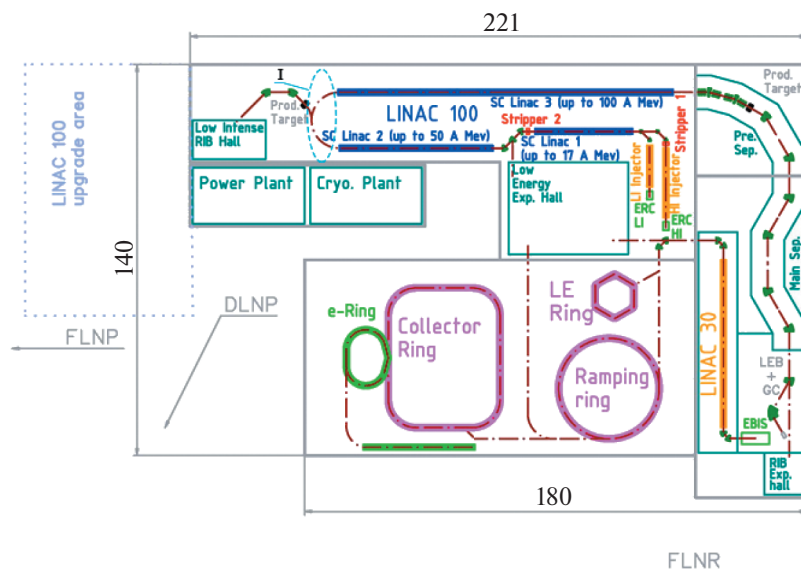


Рис. 1. Схема международного ускорительно-накопительного комплекса DERICA: I — место расположения поворотного магнитооптического ионного канала.

очередь, использование дипольных магнитов с вертикальным направлением магнитного поля, как правило, приводит к ненулевым значениям горизонтальной дисперсионной функции D_x на краях магнитооптического канала, что в дальнейшем приводит к необходимости принятия специальных мер по уменьшению энергетического разброса частиц в сгустках и обеспечению их поперечной устойчивости. Радиальное отклонение траектории частиц с импульсом p , отличающимся от импульса равновесной частицы p_0 , от траектории равновесной частицы описывается дисперсионной функцией D , являющейся решением неоднородного дифференциального уравнения [8]:

$$\frac{d^2 D_x}{ds^2} + \left[\frac{1}{\rho^2(s)} - g(s) \right] D_x = \frac{1}{\rho(s)}, \quad (1)$$

где ρ — радиус кривизны траектории иона с зарядом Z и числом нуклонов A в магнитном поле дипольного магнита, g — функция, определяемая параметрами ионно-оптического канала, s — орбитальная координата.

Отметим, что рассматривая функцию $g(s)$ как кусочно-постоянную, решение уравнения (1) может быть найдено матричным методом и записано в виде:

$$\begin{pmatrix} D_x(s) \\ D'_x(s) \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} D_x(s_0) \\ D'_x(s_0) \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где матрица передачи ионно-оптического канала транспортировки имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} C(s, s_0) & S(s, s_0) & P(s, s_0) \\ C'(s, s_0) & S'(s, s_0) & P'(s, s_0) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а элементы матрицы C , C' , S , S' совпадают с элементами соответствующей матрицы, используемой для описания решения однородного уравнения (1). Элементы P и P' определяются путем последовательного решения уравнения (1) для каждого кусочно-постоянного участка канала транспортировки.

Среднеквадратичное значение горизонтального размера сечения сгустка связано с дисперсионной функцией D_x соотношением

$$\sigma_{x, \text{rms}} = \sqrt{\beta_x \varepsilon_{x, \text{rms}} + (D_x \Delta p / p_0)^2}, \quad (4)$$

где β_x — горизонтальная бета-функция канала транспортировки, $\varepsilon_{x, \text{rms}}$ — среднеквадратическое значение горизонтального эмиттанта пучка на фазовой плоскости $(x, dx/ds)$, s — координата, отсчитываемая вдоль траектории сгустка. Из формулы (4) становится очевидной необходимость выполнения условия $D_x = 0$ в конце канала транспортировки ионов.

Предложено построить поворотный магнитооптический канал на основе семи поворотных магнитов, четыре из которых поворачивают ионы $^{238}\text{U}^{60+}$ с энергией 50 МэВ/нуклон на угол 22.5° каждый и три — на угол 30° . Для обеспечения нулевого значения дисперсионной функции магнитооптического канала на выходе использованы

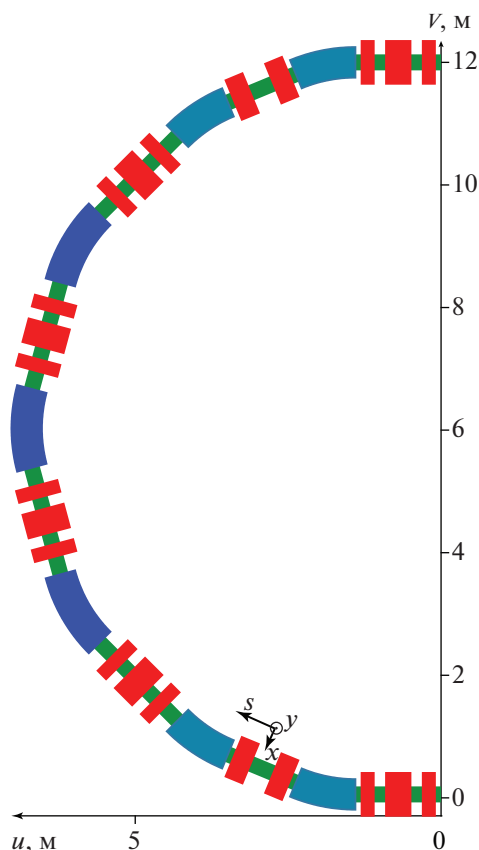


Рис. 2. Вид магнитооптического ионного поворотного канала транспортировки между первой и второй частями линейного сверхпроводящего ускорителя-драйвера LINAC-100 проекта DERICA.

квадрупольные линзы с рассчитанными градиентами магнитного поля на оси канала транспортировки, которые расположены в строго определенном порядке. Последовательность расположения магнитных элементов и их рассчитанные параметры представлены в табл. 1 и на рис. 2. Длина канала составляет 20.3 м.

Расчет оптических (структурных) функций (вертикальной и радиальной бета-функций, радиальной дисперсионной функций и набега фаз) произведен с помощью программы MADX [9]. Результаты расчета структурных функций представлены на рис. 3. На рис. 4 приведено изменение набегов фаз горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний вдоль предложенного канала. Матрица передачи канала транспортировки удовлетворяет условию симплектичности, которое в случае одномерного движения эквивалентно теореме Лиувилля. На рис. 5 представлена диаграмма резонансов, на которой отмечена рабочая точка, отвечающая параметрам предложенного канала транспортировки. Несмотря на то, что рабочая точка находится вблизи резонанса третьего порядка, предлагаемые параметры канала являются приемлемыми, поскольку канал является

однопроходным (сгусток проходит канал один раз за цикл ускорения).

С помощью программ Trace3D [10], TraceWin [11], предназначенных для численного моделирования динамики частиц в электромагнитных полях различных элементов ускорителей, выполнен трекинг моноэнергетического сгустка ионов $^{238}\text{U}^{60+}$ с энергией 50 МэВ/нуклон. При расчетах предполагалось, что поперечное сечение пучка на входе в канал является круглым, диаметр составляет 3 мм, а ток пучка равен 2 рмкА. Поперечные эмиттансы пучка приняты равными 1 мм мрад, распределение частиц в поперечных фазовых плоскостях соответствует 4-мерному распределению Капчинского—Владимирского (см. рис. 6).

В виду того, что размер пучка на выходе из поворотного канала (см. рис. 2) превышает начальное значение, предложено расположить в конце канала два квадрупольных триплета для согласования параметров сгустка ионов $^{238}\text{U}^{60+}$ со второй секцией ускорителя-драйвера LINAC-100. Основные параметры квадрупольных триплетов представлены в табл. 2.

Таблица 1. Основные параметры элементов поворотного канала (G – градиент магнитного поля на оси линзы, B – индукция магнитного поля на оси диполя)

№	Элемент	Длина, см	Параметр
1	2	3	4
1	Дрейфовый промежуток	10	–
2	Квадруполь	20	$G = 0.145$ Тл/м
3	Дрейфовый промежуток	20	–
4	Квадруполь	40	$G = -2.203$ Тл/м
5	Дрейфовый промежуток	20	–
6	Квадруполь	20	$G = 0.145$ Тл/м
7	Дрейфовый промежуток	20	–
8	Диполь	100	$B = 1.613$ Тл
9	Дрейфовый промежуток	10	–
10	Квадруполь	30	$G = -0.446$ Тл/м
11	Дрейфовый промежуток	40	–
12	Квадруполь	30	$G = -0.425$ Тл/м
13	Дрейфовый промежуток	10	–
14	Диполь	100	$B = 1.613$ Тл
15	Дрейфовый промежуток	30	–
16	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
17	Дрейфовый промежуток	20	–
18	Квадруполь	40	$G = 12.726$ Тл/м
19	Дрейфовый промежуток	20	–
20	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
21	Дрейфовый промежуток	30	–
22	Дипольный магнит	130	$B = 1.654$ Тл
23	Дрейфовый промежуток	30	–
24	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
25	Дрейфовый промежуток	20	–
26	Квадруполь	40	$G = 12.726$ Тл/м
27	Дрейфовый промежуток	20	–
28	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
29	Дрейфовый промежуток	30	–
30	Дипольный магнит	130	$B = 1.654$ Тл
31	Дрейфовый промежуток	30	–
32	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
33	Дрейфовый промежуток	20	–
34	Квадруполь	40	$G = 12.726$ Тл/м
35	Дрейфовый промежуток	20	–
36	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
37	Дрейфовый промежуток	30	–
38	Дипольный магнит	130	$B = 1.654$ Тл
39	Дрейфовый промежуток	30	–
40	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
41	Дрейфовый промежуток	20	–
42	Квадруполь	40	$G = 12.726$ Тл/м
43	Дрейфовый промежуток	20	–

Таблица 1. Окончание

№	Элемент	Длина, см	Параметр
1	2	3	4
44	Квадруполь	20	$G = -14.700$ Тл/м
45	Дрейфовый промежуток	30	—
46	Диполь	100	$B = 1.613$ Тл
47	Дрейфовый промежуток	10	—
48	Квадруполь	30	$G = -0.425$ Тл/м
49	Дрейфовый промежуток	40	—
50	Квадруполь	30	$G = -0.446$ Тл/м
51	Дрейфовый промежуток	10	—
52	Диполь	100	$B = 1.613$ Тл
53	Дрейфовый промежуток	20	—
54	Квадруполь	20	$G = 0.145$ Тл/м
55	Дрейфовый промежуток	20	—
56	Квадруполь	40	$G = -2.203$ Тл/м
57	Дрейфовый промежуток	10	—
58	Квадруполь	20	$G = 0.145$ Тл/м
59	Дрейфовый промежуток	10	—

На рис. 7 представлен результат расчета динамики сгустка ионов $^{238}\text{U}^{60+}$ в канале с дополнительными двумя квадрупольными триплетами, где приведены огибающие пучка и плотность тока как функции продольной координаты. Отме-

тим, что огибающие соответствуют среднеквадратическому размеру пучка по соответствующей оси (расчет выполнен с помощью программы TraceWin). Расчеты показывают, что сгусток проходит канал с апертурой 25 мм без потерь. Сравнивая

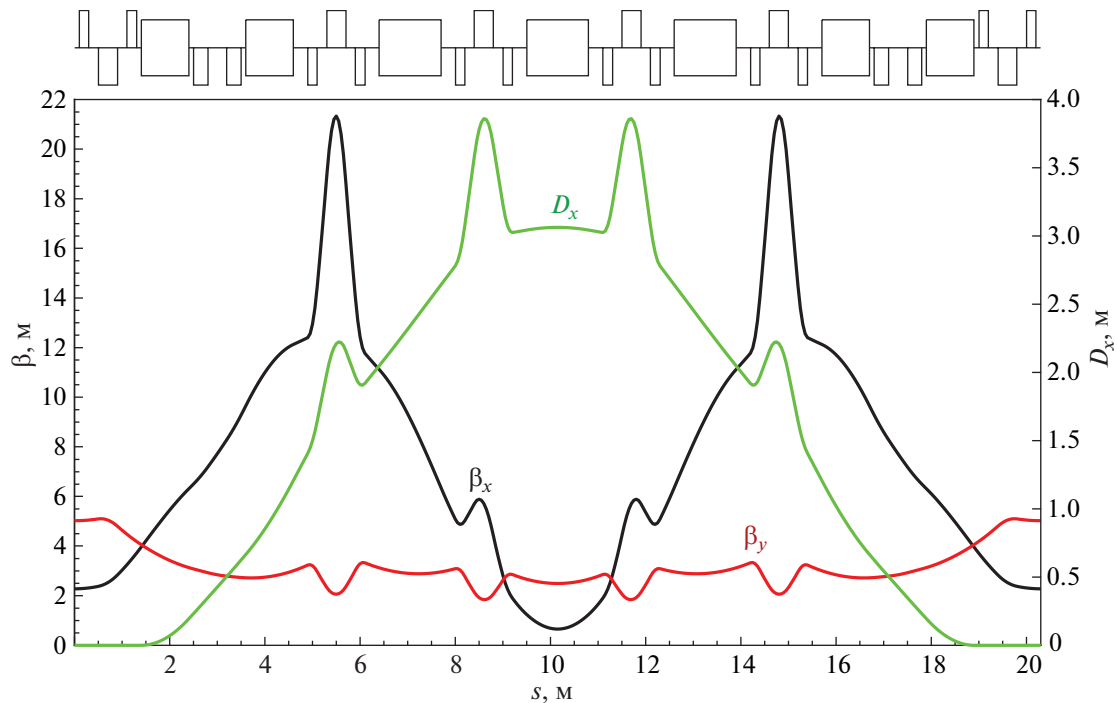


Рис. 3. Структурные функции магнитооптического поворотного канала транспортировки.

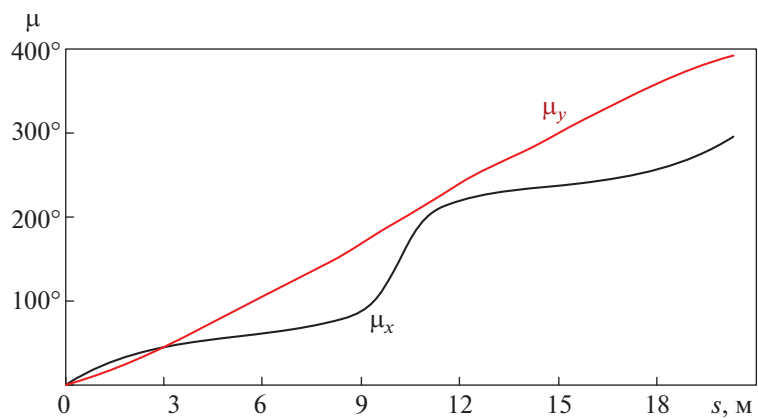


Рис. 4. Графики изменения набегов фаз радиальных (μ_x) и вертикальных (μ_y) бетатронных колебаний вдоль канала транспортировки.

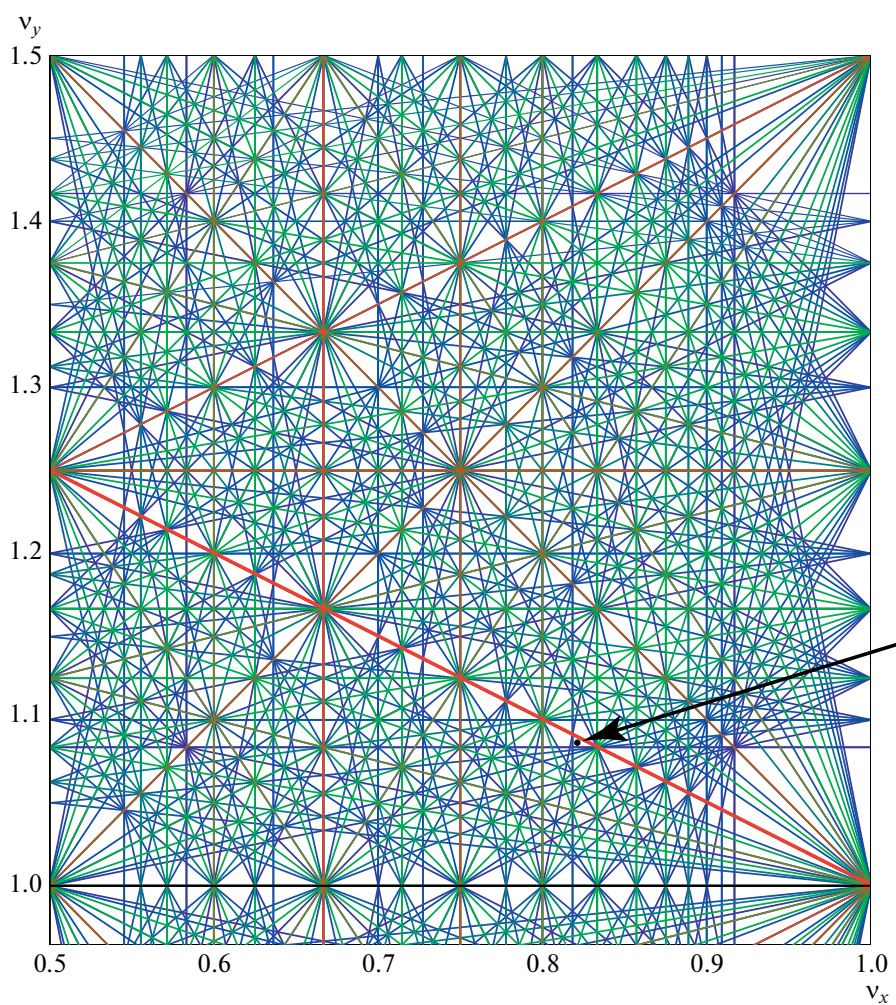


Рис. 5. Диаграмма резонансов (стрелкой указано положение рабочей точки).

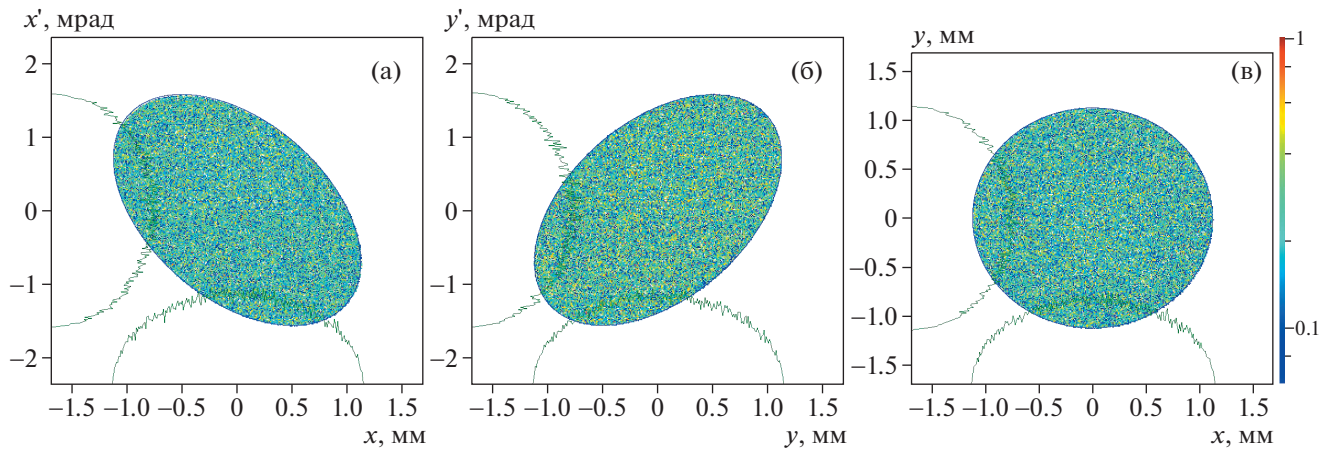


Рис. 6. Распределение ионов урана, использованное для моделирования, в начале магнитооптического поворотного канала: (а) горизонтальный эмиттанс пучка; (б) вертикальный эмиттанс пучка; (в) поперечное сечение пучка.

поведение бета-функций канала на рис. 3 с изменением огибающих на рис. 7, видно, что они хорошо коррелируют между собой в соответствии с выражением (4). Результаты моделирования, полученные с помощью программы Trace3D, совпадают с результатами, полученными с помощью программы TraceWin. Незначительное отличие в результатах обусловлено тем, что в коде Trace3D, основанном на матричном методе расчетов, не учтен эффект взаимодействия частиц внутри

сгустка. Поперечные эмиттансы пучка и его сечение на выходе из магнитооптического канала, рассчитанные с помощью программы TraceWin, представлены на рис. 8. Из данного рисунка видно, что размеры сгустка не изменились и близки к своим начальным значениям. Рассчитанные эмиттансы пучка позволяют эффективно осуществить его инжекцию во вторую секцию ускорителя-драйвера LINAC-100 [12].

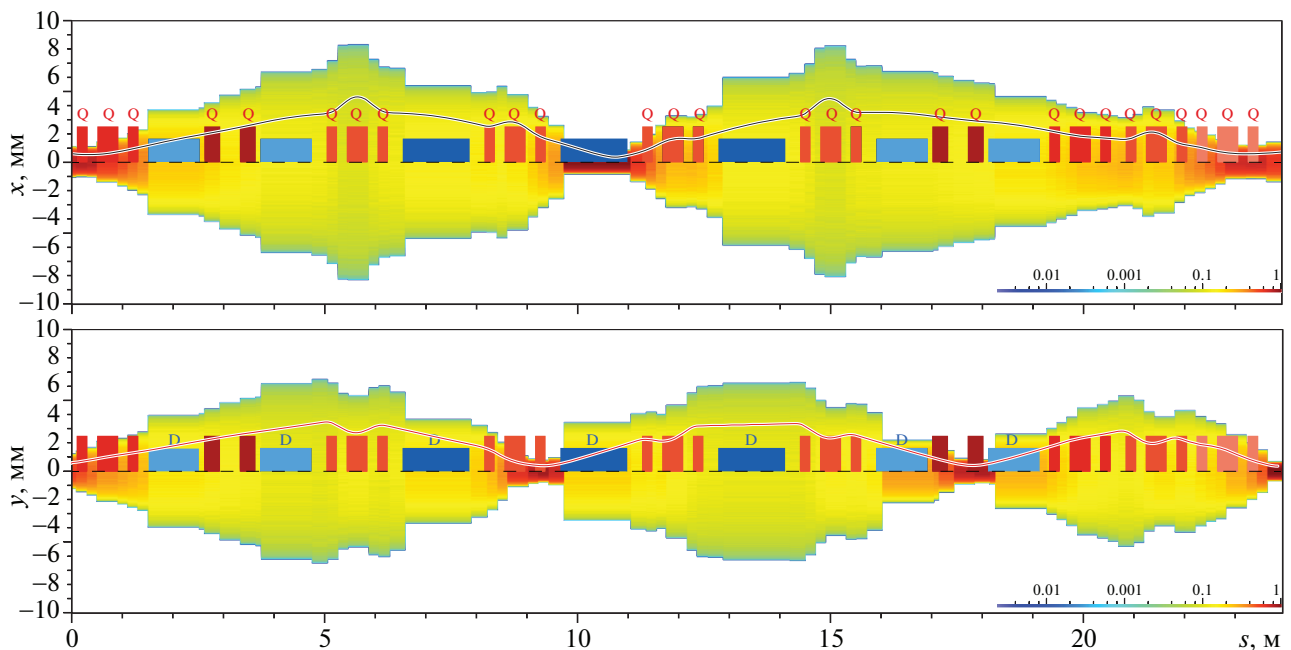
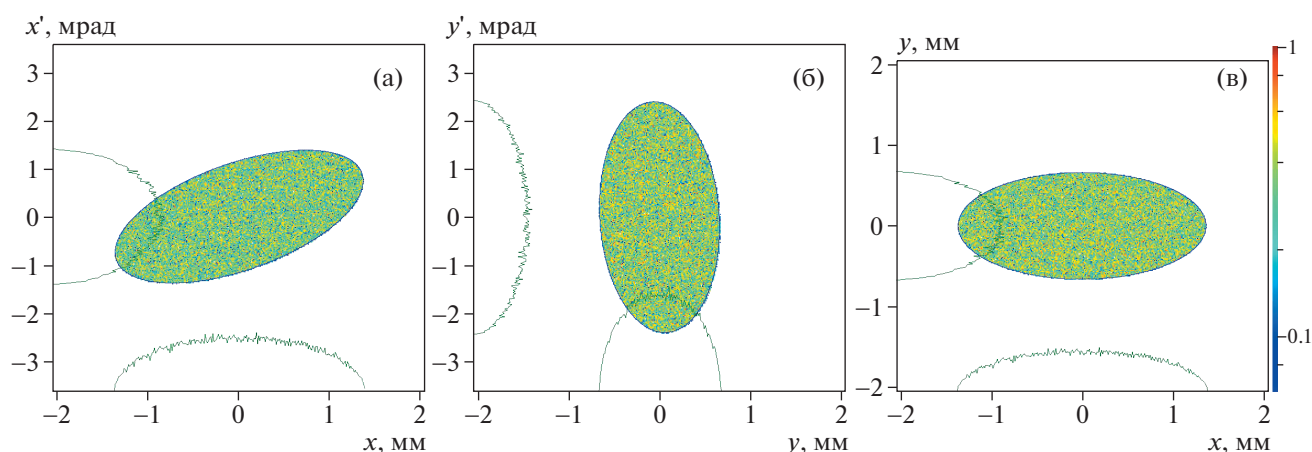


Рис. 7. Огибающие и распределение плотности тока пучка вдоль магнитооптического поворотного канала (Д — дипольный магнит, К — квадруполь).

Таблица 2. Основные параметры фокусирующих квадрупольных триплетов

№	Элемент	Длина, см	Градиент магнитного поля на оси линзы, Тл/м
1	Дрейфовый промежуток	20	—
2	Квадруполь	20	−20.83
3	Дрейфовый промежуток	20	—
4	Квадруполь	40	17
5	Дрейфовый промежуток	20	—
6	Квадруполь	20	−20.83
7	Дрейфовый промежуток	20	—
8	Квадруполь	20	6.5
9	Дрейфовый промежуток	20	—
10	Квадруполь	40	−6.5
11	Дрейфовый промежуток	20	—
12	Квадруполь	20	6.5
13	Дрейфовый промежуток	53	—


Рис. 8. Распределение ионов урана в конце магнитооптического поворотного канала с двумя согласующими квадрупольными триплетами в конце: (а) горизонтальный эмиттанс пучка; (б) вертикальный эмиттанс пучка; (в) поперечное сечение пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты моделирования динамики пучка $^{238}\text{U}^{60+}$ с энергией 50 МэВ/нуклон в ионно-оптическом транспортном поворотном канале ускорителя-драйвера LINAC-100, разрабатываемого для проекта DERICA. Предложена магнитная структура канала транспортировки ионов и основные параметры его элементов обеспечивающая нулевое значение дисперсионной функции к концу канала. По результатам численного моделирования динамики пучка урана сделан вывод о необходимости использования двух квадрупольных триплетов в конце магнитооптического поворот-

ного канала для согласования параметров пучка с входом во вторую секцию LINAC-100.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Grigorenko L.V., Sharkov B.Yu., Fomichev A.S. et al. // Phys. Usp. 2019. V. 62. No. 7. 675. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.07.038387>
2. Bisoffi G. et al. Proc. Intl. Particle Accelerator Conference IPAC'18. 2018. P. 1035–1037.
3. SPIRAL2 Detailed Design Study. GANIL. 2005. Chap. 10. <http://pro.ganil-spiral2.eu/spiral2/what-is-spiral2/apd>.
4. Wei J. et al. Proc. Intl. Conf. Heavy Ion Accelerator Technology HIAT'15. 2015. P. 6–10.

5. Status and Future Plan of Rare Isotope Science Project. https://risp.ibs.re.kr/eng/orginfo/intro_project.do.
6. Marchetto M., Kiy S., Laxdal R.E. et al. Proc. Intl. Conf. Heavy Ion Accelerator Technology HIAT'15. 2015. P. 175–179.
7. Grigorenko L.V., Fomichev A.S., Dyubkov V.S., et al. Design of LINAC-100 and LINAC-30 for new rare isotope facility project DERICA at JINR. Proc. 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams. 2018. P. 220–225.
8. Пашков П.Т. Физика пучка в кольцевых ускорителях. 2006. Москва: ФИЗМАТЛИТ. ISBN 5-9221-0731-3.
9. Deniau L., Grote H., Roy Gh., The MAD-X Program User's Reference Manual. Ver. 5.03.07. <http://cern.ch/madx/releases/last-rel/madxguide.pdf>.
10. Crandall K.R., Rusthoi D.P. TRACE 3-D Documentation. 1997. Los Alamos Natl. Laboratory: Los Alamos, NM, USA.
11. Uriot D., Pichoff N. Proc. Intl. Particle Accelerator Conference IPAC'15. 2015. P. 92–94.
12. Лозеева Т.А., Лозеев Ю.Ю., Полозов С.М., Самошин А.В., Григоренко Л.В., Фомичев А.С., Барт В., Ярамышев С. // Ядерн. физ. инжин. 2019. Т. 10. № 4. С. 341–348 [Lozeeva T.A., Lozeev Yu.Yu., Polozov S.M., Samoshin A.V., Grigorenko L.V., Fomichev A.S., Barth, W., Yaramyshev S. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1519].

Turning Channel of Uranium Ions with Suppressed Dispersion at the Edges for DERICA Project

V. S. Dyubkov^{1, *} and V. Yu. Mekhanikova¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: VSDyubkov@mephi.ru

Received June 4, 2020; revised June 29, 2020; accepted June 29, 2020

Abstract— $^{238}\text{U}^{60+}$ ion beam dynamics simulations results in a lattice that turns particles at 180 degrees and located between two LINAC-100 superconducting sections of DERICA project (JINR, Dubna, Russia) for studying radioactive isotopes are presented. Lattice layout is proposed. Parameters of its optic element are chosen so that dispersion function has zero value at the entrance and exit of the channel for transporting the 50 MeV/nucleon ion beam.

Keywords: accelerators, lattice, optic functions, beam dynamics