

## Численное моделирование ионно-оптических систем вытягивания, ускорения и согласования с радиочастотным квадрупольным ускорителем для пучка отрицательных ионов водорода

© В.С. Кленов, Б.А. Фролов<sup>¶</sup>

Государственный научный центр Российской Федерации — Институт физики высоких энергий,  
142281 Протвино, Московская обл., Россия

<sup>¶</sup> e-mail: bfrolov.ihep@list.ru

(Поступило в Редакцию 28 марта 2017 г.)

Источник отрицательных ионов водорода разрабатывается в ИФВЭ с целью применения многооборотной перезарядной инжекции для увеличения интенсивности ускорительного комплекса У-70. Для моделирования и оптимизации системы вытягивания пучка ионов из плазмы, его ускорения до энергии 100 keV и согласования с радиочастотным квадрупольным ускорителем (RFQ) использована трехмерная ионно-оптическая программа IBSimu. Рассчитана система извлечения из плазмы пучка ионов с током 50 mA и с подавлением электронного потока. Проведено сравнительное исследование магнитных каналов транспортировки, состоящих из двух соленоидов и из шести квадрупольных линз. Конечной целью при расчете согласующего канала было достижение требуемых Твисс-параметров и минимизация роста эмиттанса на входе в RFQ.

DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45891.2270

### Введение

Одной из основных фундаментальных задач современного развития протонных ускорителей является повышение интенсивности пучков. В ведущих ускорительных центрах мира для этой цели широко применяется перезарядная инжекция отрицательных ионов водорода ( $H^-$ ) в ускорители высоких энергий. В ИФВЭ совместно с ИЯИ разрабатывается источник отрицательных ионов водорода для инжекции в линейный ускоритель ЛУ-30. Внедрение источника отрицательных ионов водорода в качестве инжектора линейного ускорителя и организация многооборотной перезарядной инжекции на выходе кольцевого ускорителя У-1.5 (бустера) позволит поднять интенсивность ускорительного комплекса У-70 в несколько раз (до  $3 \cdot 10^{13}$  протонов за цикл), что создаст новые возможности для фундаментальных научных и прикладных исследований. Для реализации перезарядной инжекции разрабатывается источник, генерирующий пучки ионов  $H^-$  с параметрами: ток  $\geq 50$  mA, длительность импульса —  $25 \mu s$ , частота повторения — 25 Hz, энергия ионов — 100 keV, отношение  $e/H^- < 5$ . На основе опыта работы с источником отрицательных ионов водорода в ИЯИ РАН [1] и ИЯФ СО РАН [2], а также анализа публикаций о работе источников отрицательных ионов в BNL [3], ISIS [4], FNAL [5], CERN [6], в качестве источника ионов  $H^-$  был выбран поверхностно-плазменный источник с газоразрядной камерой пеннинговского типа с осесимметричным эмиссионным отверстием на выходе ионного источника. Для вытягивания ионов из плазмы, формирования пучка с минимальными абберациями, ускорения его до энергии 100 keV и согласования оптических параметров пучка со входом линейного ускорителя необходима высококаче-

ственная ионно-оптическая система (ИОС). В ведущих ускорительных центрах (CERN, SNS и др.) для моделирования процессов извлечения из плазмы отрицательных ионов и транспортировки пучка широко используется 3D программа IBSimu (Ion Beam Simulation) [7]. Программа с хорошей точностью описывает экспериментальные результаты [8–10].

В работе [11] с помощью 3D программы IBSimu была рассчитана трехэлектродная ИОС вытягивания ионов  $H^-$  из плазмы и ускорения пучка до энергии 100 keV. На входе в линейный ускоритель ЛУ-30 пучок ионов с током 50 mA и энергией 100 keV должен иметь следующие параметры: нормализованный эмиттанс  $\leq 1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  (для 100% пучка), Твисс-параметры фазового эллипса  $\alpha = 2.3$ ,  $\beta = 0.14 \text{ m/rad}$ . В [11] в качестве первого приближения транспортировка пучка через согласующий канал из двух соленоидов до входа в радиочастотный квадрупольный ускоритель (RFQ) была промоделирована с помощью программы TRACE-2D [12]. Расчеты линии транспортировки низкоэнергетичного пучка (LEBT), выполненные с помощью TRACE-2D, не учитывают распределение полей и пространственный заряд и не позволяют оценить рост эмиттанса пучка при его транспортировке до RFQ. В настоящей работе с помощью программы IBSimu проведено 3D моделирование всей системы, включающей трехэлектродную ИОС и двухсоленоидальную LEBT с учетом реального распределения полей для пучка с током 50 mA. В качестве исходных данных для моделирования LEBT были взяты параметры частиц, полученные в результате моделирования системы вытягивания пучка из источника. Конечной целью расчетов было достижение требуемых Твисс-параметров и минимизация роста эмиттанса на входе в RFQ. Рассмотрен вариант канала согласо-

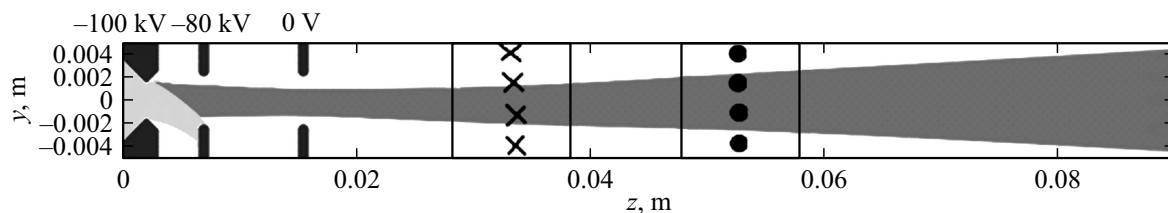


Рис. 1. Траектории ионов и электронов для трехэлектродной ИОС.

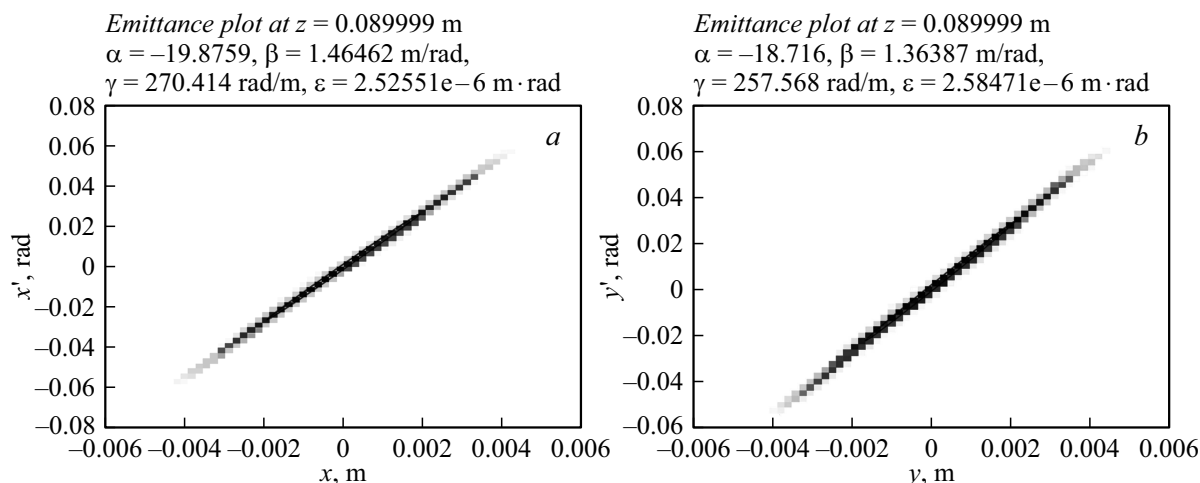


Рис. 2. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскостях  $xx'$  (a) и  $yy'$  (b) при  $z = 90$  mm для трехмерного моделирования системы, показанного на рис. 1.

вания, состоящий из магнитных квадрупольных линз. Для канала из квадрупольных линз оказалось трудно обеспечить согласование пучка с входом ускорителя для случая трехэлектродной ИОС из-за значительного углового разброса, приобретаемого пучком на длине дрейфа перед входом в канал. Для уменьшения радиуса и угла расходимости пучка на входе в согласующий канал была рассчитана ИОС, состоящая из пяти электродов.

## ИОС вытягивания и ускорения пучка до энергии 100 keV

Трехэлектродная ИОС вытягивания и ускорения ионов  $H^-$ , образованная плазменным, вытягивающим и ускоряющим электродами, разбита на два промежутка (рис. 1). Первый промежуток должен обеспечить вытягивание интенсивного пучка ионов  $H^-$  из плазмы газового разряда. Ускорение ионов до энергии 100 keV происходит во втором промежутке. Плазменный электрод является анодом газового разряда и находится под импульсным потенциалом  $-100$  kV. Вытягивающий электрод имеет потенциал  $+20$  kV относительно плазменного электрода, ускоряющий электрод заземлен. Эмиссионное отверстие диаметром 3 mm выбрано по аналогии с версией пеннинговского источника, разработанного в ИЯФ СО РАН [3]. Выбор оптимальной геометрии трехэлектродной ИОС — радиусов вытягивающего (2 mm)

и ускоряющего (2 mm) электродов и длин вытягивающего (3.3 mm) и ускоряющего (7.5 mm) промежутков — проводился на основе серии детальных 3D расчетов из условия получения минимального эмиттанса на входе в согласующий канал. После ускоряющего промежутка предусмотрено дрейфовое пространство (около 140 mm) до входа в канал согласования. Оно предназначено для откачки газа, размещения магнитного корректора и индукционного датчика измерения тока ионов.

3D моделирование и оптимизация ИОС проводились с помощью программы IBSimu для тока вытягиваемых ионов  $H^-$  50 mA при сопутствующем токе электронов 150 mA с учетом рассеянного поперечного магнитного поля пеннинговского разряда. Магнитное поле ионного источника с индукцией на оси около 0.1–0.15 T проникает в область извлечения и ускорения пучка и отклоняет от оси отрицательные ионы в вытягивающем и ускоряющем промежутках. Электронная компонента будет отклоняться магнитным полем источника из ионного пучка на извлекающий электрод. Для выведения пучка ионов  $H^-$  на ось с нулевым угловым отклонением используется пара корректирующих диполей с противоположно направленными полями. Каждый диполь состоит из двух SmCo магнитов ( $10 \times 20 \times 10$  mm<sup>3</sup>) с остаточным полем 0.7 T. Магнитный поток замыкается железным ярмом, на которое намотана дополнительная подстроечная обмотка. Настройка бесшумового режима

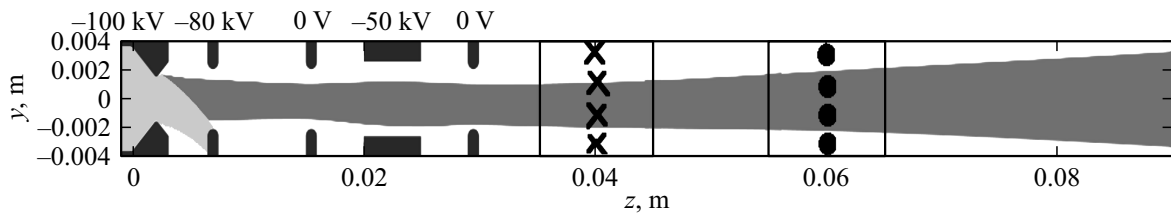


Рис. 3. Траектории ионов и электронов для пятиэлектродной ИОС.

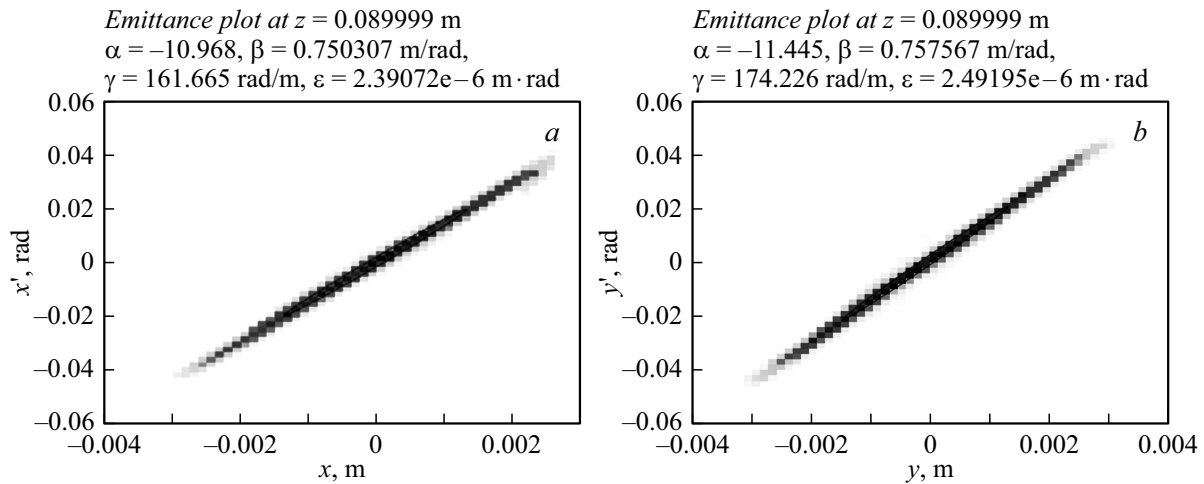


Рис. 4. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскостях  $xx'$  (a) и  $yy'$  (b) при  $z = 90$  mm для трехмерного моделирования системы, показанного на рис. 3.

генерации ионного пучка в источнике  $H^-$  будет проводиться за счет оптимизации подачи водорода, цезия и величины магнитного поля в разряде. Точное значение величины магнитного поля источника неизвестно. Поэтому диполи должны иметь дополнительные подстроечные обмотки, предназначенные для компенсации отклонения пучка при разных значениях магнитного поля источника. Диполи размещаются в дрейфовом промежутке между ускоряющим электродом и каналом согласования (их координаты по оси  $z$ : 28–38 mm и 48–58 mm).

При моделировании поперечная температура ионов и электронов бралась равной 2 eV, плазменный потенциал 10 eV, начальная энергия частиц 5 eV, число частиц каждой компоненты 25 000. Магнитные поля источника, диполей, соленоидов и квадруполей вычислялись с помощью программы ANSYS и данные магнитных полей вставлялись в IBSimu. Траектории ионов (черные) и электронов (серые) с учетом магнитных полей источника и диполей в трехэлектродной ИОС показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что рассеянное магнитное поле источника (при максимальном значении на оси 0.1 T) надежно отклоняет электроны в вытягивающем промежутке на извлекающий электрод. На рис. 2 показаны фазовые портреты пучка в плоскостях  $xx'$  и  $yy'$  при  $z = 90$  mm.

Для уменьшения радиуса и угла расходимости пучка на входе в согласующий канал и с целью расширения

фокусирующих возможностей ИОС были рассмотрены варианты ИОС с дополнительными электродами, на которые подавался ускоряющий или замедляющий потенциал. Оптимальный вариант, обеспечивающий минимальный рост эмиттанса в такой системе, состоящей из пяти электродов, имеющих потенциалы  $-100$  kV,  $-80$  kV,  $0$  V,  $-50$  kV,  $0$  V, показан на рис. 3. Первые три электрода имеют такие же размеры, что и для трехэлектродной ИОС. Радиус четвертого электрода 2.5 mm, а расстояние от него до третьего и пятого электродов 4 mm. Координаты диполь-антидипольной магнитной системы:  $z = 35-45$  mm и  $z = 55-65$  mm.

На рис. 4 показаны фазовые портреты пучка в плоскостях  $xx'$  и  $yy'$  при  $z = 90$  mm для пятиэлектродной ИОС. Одиночная линза, образованная электродами с потенциалами  $0$  V,  $-50$  kV,  $0$  V, уменьшает радиус и угол расходимости пучка на входе в согласующий канал (рис. 2 и 4) и, кроме того, позволяет производить регулировку и настройку этих параметров.

### Моделирование пучка для LEBT из двух соленоидов

В программе IBSimu для вычислений используется сетка с постоянным шагом. Поэтому 3D моделирование ИОС и LEBT производилось в два этапа. ИОС рассчитывалась с малым шагом сетки ( $5 \cdot 10^{-2}$  mm),

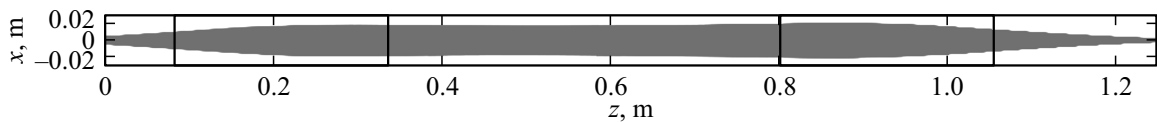


Рис. 5. Траектории ионов  $H^-$  в канале согласования из двух соленоидов для пучка с током 50 мА.

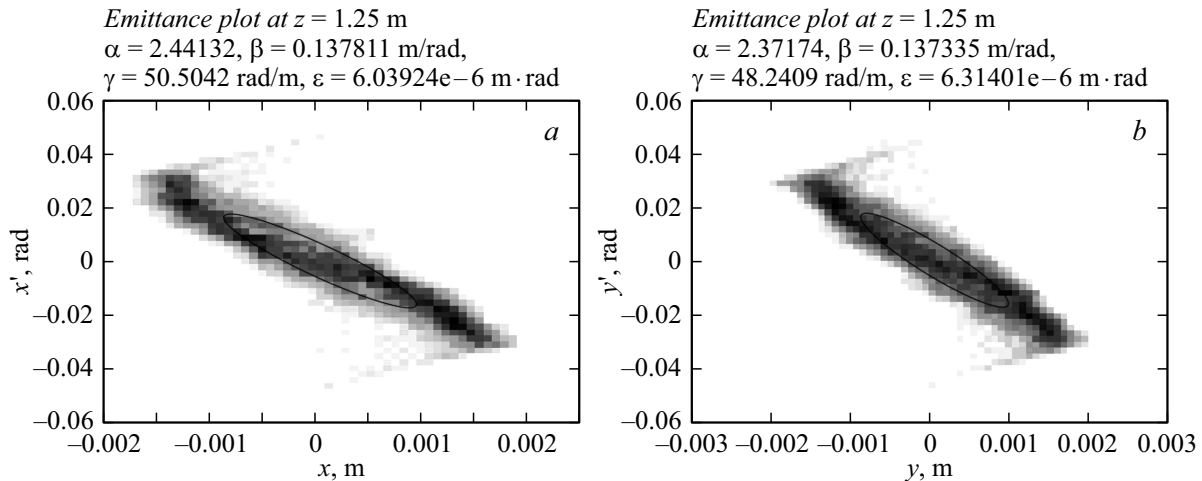


Рис. 6. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскостях  $xx'$  (a) и  $yy'$  (b) на выходе LEBT из двух соленоидов.

Таблица 1. Твисс-параметры и rms эмиттанс на входе и выходе LEBT из двух соленоидов

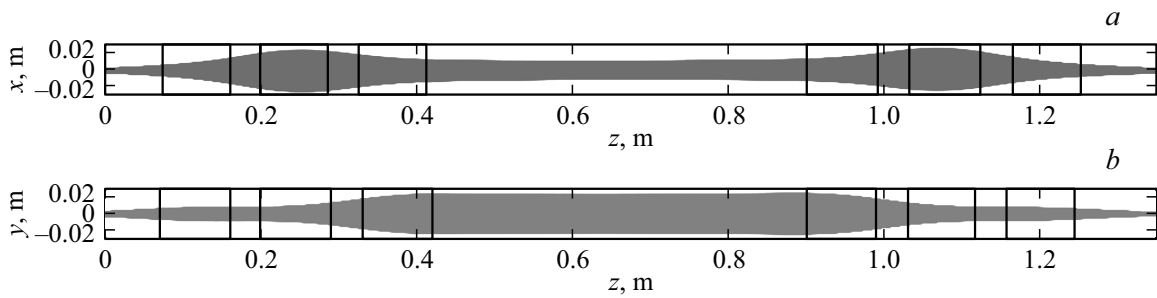
LEBT	$\alpha_x$	$\beta_x$ , m/rad	$E_{rms} \cdot 10^{-6}$ , m · rad	$\alpha_y$	$\beta_y$ , m/rad	$E_{rms} \cdot 10^{-6}$ , m · rad
Вход	-19.9	1.46	2.53	-18.7	1.36	2.58
Выход	2.42	0.136	6.04	2.35	0.136	6.31

необходимым для моделирования процессов извлечения ионов из плазмы в области эмиссионного электрода. Моделирование LEBT проводилось на сетке с более крупным шагом ( $4 \cdot 10^{-1}$  мм). Фазовые координаты пучка на входе в LEBT были взяты из расчета трехэлектродной ИОС. Согласующий канал состоял из двух соленоидов (рис. 5). Длина каждого соленоида с железным экраном 0.255 м (координаты первого и второго соленоида по оси  $z$  — 0.08–0.335 м и 0.805–1.06 м соответственно), радиус апертуры 0.06 м, расстояние между ними 0.47 м выбрано для размещения вакуумного оборудования и диагностического устройства. Общая длина канала согласования 1.25 м. В результате оптимизации для получения на выходе LEBT-пучка с требуемыми Твисс-параметрами максимальная величина магнитного поля первого соленоида составила 0.524 Т, второго — 0.496 Т. На рис. 5 приведены траектории ионов в канале согласования для пучка с током 50 мА. Фазовые портреты в плоскостях  $xx'$  и  $yy'$  на выходе LEBT показаны на рис. 6.

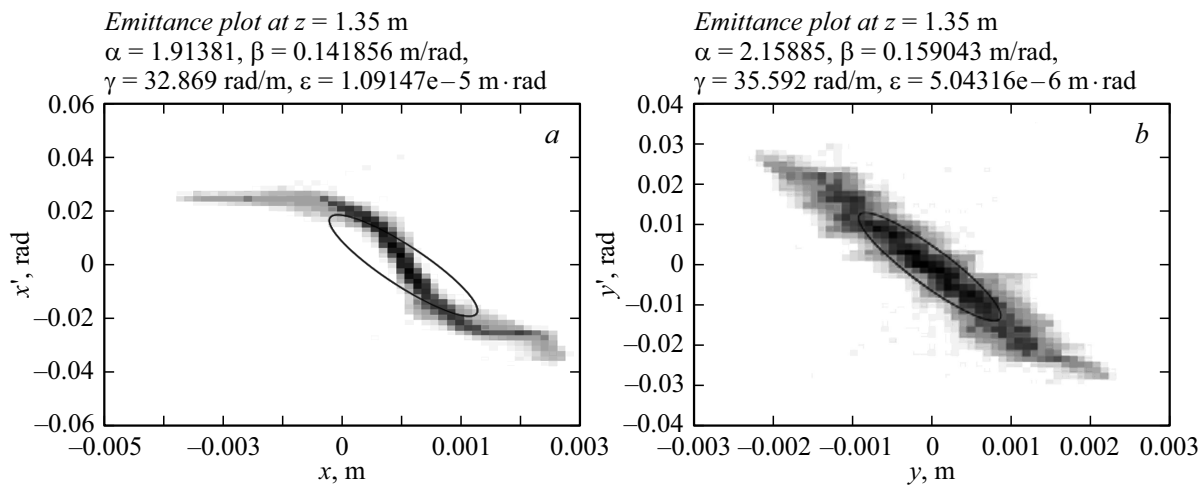
В табл. 1 приведены значения Твисс-параметров и величины эмиттансов на входе и выходе согласующего канала из двух соленоидов. Твисс-параметры на выходе канала согласования близки к требуемым на входе в RFQ. Точного согласования для обеих плоскостей достичь невозможно из-за отклонений пучка от  $xu$ -симметрии на входе в LEBT. На выходе LEBT эмиттанс увеличился в 2.4 раза в обеих плоскостях, нормализованный 4 rms эмиттанс равен  $0.35 \pi$  мм · рад в плоскости  $xx'$  и  $0.37 \pi$  мм · мрад в плоскости  $yy'$ .

## Моделирование пучка для LEBT из квадрупольных линз

Недостатком канала согласования пучка  $H^-$  со входом RFQ, состоящего из двух соленоидов, является высокая стоимость оборудования и эксплуатации. ИОС из пяти электродов дает возможность использовать для согласования пучка с RFQ систему из 6 магнитных квадрупольных линз, сгруппированных в 2 триплета (рис. 7). Применение LEBT из квадрупольных линз вместо двух соленоидов существенно снижает стоимость оборудования и эксплуатации. Фазовые координаты пучка на входе в LEBT соответствовали параметрам, полученным из расчета пятиэлектродной ИОС. Было рассмотрено несколько вариантов LEBT из квадрупольных линз с разной геометрией (длиной и диаметром) и разными расстояниями между ними. Геометрические размеры квадрупольных линз выбирались с учетом компромисса между требованием умеренных градиентов и необходимостью транспортировки интенсивного пучка. В ре-



**Рис. 7.** Траектории ионов  $H^-$  в канале согласования из квадрупольных линз для пучка с током 50 мА в плоскостях  $xz$  (a) и  $yz$  (b).



**Рис. 8.** Расчетный фазовый портрет пучка в плоскости  $x x'$  (a) и  $y y'$  (b) на выходе LEBT из квадрупольных линз.

**Таблица 2.** Твисс-параметры и rms эмиттанс на входе и выходе LEBT из квадрупольных линз

LEBT	$\alpha_x$	$\beta_x, \text{ m/rad}$	$E_{\text{rms}} \cdot 10^{-6}, \text{ m} \cdot \text{rad}$	$\alpha_y$	$\beta_y, \text{ m/rad}$	$E_{\text{rms}} \cdot 10^{-6}, \text{ m} \cdot \text{rad}$
Вход	-10.97	0.75	2.39	-11.45	0.758	2.49
Выход	1.91	0.142	10.9	2.16	0.159	5.04

зультате оптимизации геометрии канала и магнитных полей линз удастся получить лишь приближенные значения Твисс-параметров на выходе LEBT. На рис. 7 приведены траектории ионов для одного из наиболее оптимальных вариантов канала согласования в плоскостях  $xz$  и  $yz$  для пучка ионов  $H^-$  с током 50 мА. Диаметр апертуры канала 0.08 м, длина полюсов 0.09 м. Общая длина канала согласования 1.3 м. Координаты линз по оси  $z$ : 0.07–0.16 м, 0.2–0.29 м, 0.33–0.42 м, 0.9–0.99 м, 1.03–1.12 м, 1.16–1.25 м. Соответствующие величины градиентов магнитных полей линз равны  $\mp 4.156 \text{ T/m}$ ,  $\pm 5.226 \text{ T/m}$ ,  $\mp 2.731 \text{ T/m}$ ,  $\mp 2.797 \text{ T/m}$ ,  $\pm 5.062 \text{ T/m}$ ,  $\mp 3.559 \text{ T/m}$  (верхний знак для плоскости  $xz$ , нижний для плоскости  $yz$ ). Фазовые портреты в плоскостях  $x x'$  и  $y y'$  на выходе LEBT показаны на рис. 8.

В табл. 2 приведены значения Твисс-параметров и величины эмиттансов на входе и выходе согласующего канала, составленного из 6 квадрупольных линз. Результаты расчетов свидетельствуют о заметном искажении фазового портрета и существенно более значительном росте эмиттанса на выходе согласующего канала в плоскости  $x x'$  (в 4.6 раза) по сравнению с плоскостью  $y y'$  (в плоскости  $y y'$  эмиттанс увеличивается в 2 раза).

### Заключение

Выполнен численный расчет и оптимизация ИОС вытягивания, формирования и транспортировки пучка ионов  $H^-$  с током 50 мА. Проведено сравнительное моделирование магнитных каналов согласования пучка со входом линейного ускорителя ЛУ-30. LEBT из двух соленоидов позволяет получить на входе в RFQ Твисс-параметры, близкие к оптимальным при росте эмиттанса пучка в 2.4 раза. Нормализованный 4 rms эмиттанс на выходе двухсоленоидальной LEBT ( $0.35 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  в плоскости  $x x'$  и  $0.37 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  в плоскости  $y y'$ ) почти в 3 раза меньше значения нормализованного эмиттанса на входе в ускоритель ( $1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  для 100% пучка), полученного из расчета

динамики пучка в RFQ. LEVT из квадрупольных линз позволяет достичь гораздо менее удовлетворительного согласования параметров пучка при более существенном росте эмиттанса в одной из плоскостей. Следует также заметить, что канал согласования пучка, состоящий из двух соленоидов, в отличие от системы из двух триплетов, составленных из магнитных квадрупольных линз, отличается простотой регулировки (всего две ручки настройки).

## Список литературы

- [1] *Belov A.S., Frolov O.T., Klenov V.S., Yakushev V.P.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. Vol. 63. N 4. P. 2622–2624.
- [2] *Belchenko Yu.I., Gorbovsky A.I., Ivanov A.A.* et.al. // Upgrade of CW Negative Hydrogen Ion Source. AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1515. N 1. P. 448–455.
- [3] *Alessi J.G.* // Performance of the Magnetron H<sup>-</sup> Source on the BNL 200 MeV Linac. AIP Conf. Proc. 2012. Vol. 642. P. 279–281.
- [4] *Lettry J., Alessi J., Faircloth D., Gerardin A., Kalvas T., Pereira P., Sgobba S.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. N 2. P. 02A728.
- [5] *Tan C.Y., Bollinger D.S., Duel K.L., Lackey J.R., Pellico W.A.* // Proc. of 2011 Particle Accel. Conf. NY, USA WEP115. 2011. P. 1701–1703.
- [6] *Lettry J., Aguglia D., Anderson P.* et. al. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. N 2. P. 02B122.
- [7] *Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Árje J., Clark H.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. N 2. P. 02B703.
- [8] *Kalvas T., Welton R.F., Tarvainen O., Han B.X., Stocli M.P.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. N 2. P. 02A705.
- [9] *Midttun Ø., Kalvas T., Kronberger M., Lettry J., Pereira H., Schmitzer C., Scrivens R.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. N 2. P. 02B710.
- [10] *Valerio-Lizarraga C.A., Lallement J.-B., Leon-Monzon I., Lettry J., Midttun Ø., Scrivens R.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. N 2. P. 02A505.
- [11] *Frolov B.A., Klenov V.S., Mihailov V.N., Volodkevich O.M.* // RuPAC 2014, THPSC46, Obninsk, Russia. 2014. P. 429–431.
- [12] *Crandall K.R., Rusthoi D.P.* // TRACE 3-D Documentation, LA-UR-97-886, Los Alamos National Laboratory. 1997.