

# ДИНАМИКА ПУЧКА ИОНОВ УГЛЕРОДА $C^{+5}$ В СИСТЕМЕ ИНЖЕКЦИИ УСКОРИТЕЛЯ И-100 И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

*Н. Е. Анферов, Ю. А. Буданов, Б. А. Фролов*<sup>1</sup>

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

Впервые проведено моделирование динамики пучка ионов углерода  $C^{+5}$  в ионно-оптической системе инжекции в ускоритель И-100. Моделирование проводилось как для существующей системы, так и для модернизированного варианта инжекции с использованием дополнительного соленоида. Магнитное поле соленоида на участке дрейфа от ускорительной трубки до входа в канал согласования из квадрупольных линз фокусирует пучок и уменьшает его потери в канале транспортировки. В расчетах динамики пучка с учетом соленоида установлены параметры системы инжекции, при которых удается существенно поднять ток ионов углерода и яркость пучка на входе в ускоритель И-100.

The dynamics of a  $C^{+5}$  carbon ion beam in an ion-optical injection system of the I-100 accelerator has been simulated for the first time. The simulation was carried out for the existing system and for the upgraded version of injection with an additional solenoid. The magnetic field of the solenoid focuses the beam in the drift section from the accelerating tube to the input of the quadrupole matching channel and it reduces losses in the transport channel. The conditions of the injection system are obtained under which it is possible to significantly increase the current of carbon ions and the brightness of the beam at the input of the I-100 accelerator.

PACS: 29.27.Ac

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на базе существующего в НИЦ «Курчатовский институт»–ИФВЭ ускорительного комплекса У-70 исследуется возможность организации Центра ионно-лучевой терапии для лечения радиорезистентных онкологических заболеваний с помощью ионов углерода  $C^{+6}$  [1, 2]. В результате оптимизации режимов работы ускоряющей системы линейного ускорителя И-100 на выходе инжектора удалось увеличить максимальную амплитуду тока ядер углерода  $C^{+6}$  до 20 мА при токе ионов углерода на выходе ускорительной трубки около 600 мА (преобразование ионов  $C^{+5}$

---

<sup>1</sup>E-mail: bfrolov.ihep@list.ru

в  $C^{+6}$  осуществляется на выходе И-100 с помощью перезарядной мишени с коэффициентом 0,98). Одной из возможных причин, приводящих к уменьшению тока ускоренных ионов  $C^{+5}$ , могут быть существенные потери пучка в канале транспортировки от ускорительной трубки до входа в линейный ускоритель. Канал транспортировки и согласования пучка состоит из дрейфового промежутка и двух квадрупольных дуплетов. Диаметр апертуры канала на участке дрейфа длиной 1,7 м от ускорительной трубки (УТ) до входа в согласующий канал из квадрупольных линз равен 110 мм, диаметр апертуры согласующего канала — 40 мм. Пучок из УТ расходящийся, и для фокусировки пучка на дрейфовой трубе в 2019 г. был смонтирован соленоид. Эксперименты, проведенные при величине магнитного поля до 0,4 Тл, показали, что величина тока ионов углерода  $C^{+5}$  на выходе ускорителя И-100 практически не изменилась. С целью увеличения тока на выходе линейного ускорителя И-100 представляется целесообразным провести 3D-моделирование пучка ионов углерода  $C^{+5}$  в УТ и в канале транспортировки. В ведущих ускорительных центрах мира (CERN, SNS и др.) для моделирования ионных пучков широко используется 3D-пакет IBSimu (Ion Beam Simulation) [3]. IBSimu с хорошей точностью описывает экспериментальные результаты [4–7]. Эта программа была использована при проведении численных расчетов в данной работе. Моделирование канала согласования проводилось с помощью программы PathManager (CERN).

## 1. ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ

Линейный ускоритель типа Альвареца И-100 был спроектирован [8] и использовался с 1967 г. по 2000 г. для ускорения протонов ( $Z/A = 1$ ). Проведенные в 2000–2001 гг. исследования показали возможность ускорения в И-100 ионов с  $Z/A \leq 0,5$  на второй кратности [9, 10]. В результате многолетних экспериментов был разработан лазерный источник многозарядных ионов углерода, способный производить ионы  $C^{+5}$  с плотностью тока  $\sim 12$  мА/см<sup>2</sup> (на расстоянии 1,3 м от облучаемой мишени). Длительность процесса образования многозарядных ионов для лазерного ионного источника составляет несколько десятков наносекунд. Необходимая для ускорительного комплекса длительность ионного пучка в несколько микросекунд достигается благодаря тепловому разбросу скоростей ионов в плазме и дрейфу ионов от мишени до плоскости экстракции. В начальной части токового импульса основную часть составляют ионы с зарядом  $Z = 5$  [9, 10]. Ток ионов  $C^{+6}$  значительно меньше.

Моделирование ионно-оптической системы (ИОС) проводилось в несколько этапов. Сначала на основе программы IBSimu была составлена и отлажена трехмерная программа моделирования пучка ионов углерода в ускорительной трубке И-100. Ввиду необходимости больших вычислительных ресурсов расчеты проводились на кластере НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. УТ инжектора И-100 конструктивно состоит из двух трубок (tube 1 длиной 700 мм и tube 2 длиной 1520 мм). Внутренний диаметр УТ 500 мм. Ускорительная трубка содержит 60 диафрагм, разделенных изолирующими кольцами (19 диафрагм в tube 1 и 41 в tube 2). Диафрагмы соединены с высоковольтным водяным делителем напряжения. При проведении вычислений УТ разделена на три участка (section 1, section 2, section 3) входным фланцем под потенциалом 700 кВ, двумя сеточными электродами (S1, S2) под потенциалами 400 кВ

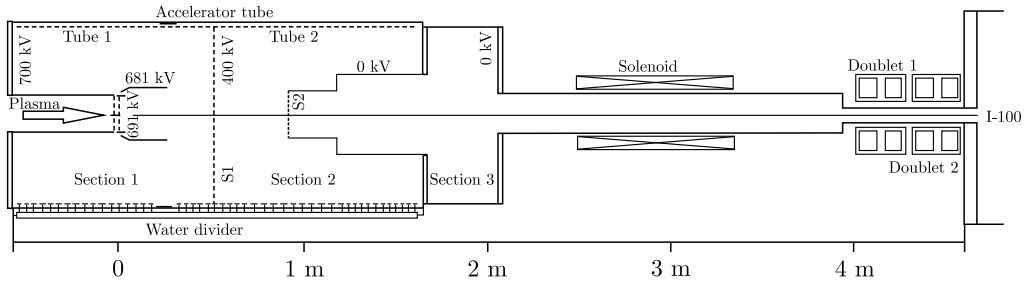


Рис. 1. Схема ускорительной трубки и транспортного канала И-100

и 0 кВ соответственно и выходным фланцем (рис. 1). Моделирование пучка ионов углерода в ускорительной трубке проводилось поочередно в каждой секции. Коэффициент токопрохождения для каждой сетки 0,92. Фазовые координаты пучка на входе каждого участка брались из расчета предыдущего. На рис. 1 показана принципиальная схема ускорительной трубки и канала транспортировки, включающего соленоид и пару квадрупольных дуплетов.

В конструкции лазерного источника отбор ионов из плазмы осуществлялся с фиксированной границы плазмы с помощью двухсеточного плазменного диода [9]. В качестве стартовой плоскости ионов рассматривалась вторая сетка плазменного диода под потенциалом 691 кВ. В расчетах плотность тока вытягиваемых ионов  $C^{+5}$  принималась равной  $9 \text{ mA/cm}^2$ . Радиус пучка в плоскости старта — 5 см, начальная энергия ионов  $C^{+5}$  составляла  $3,75 \text{ кэВ/нуклон}$ , число частиц — 60 000. Потенциал фокусирующего электрода равен  $-19 \text{ кВ}$  относительно фланца. Заметим, что в расчетах ток на выходе УТ можно увеличить, повысив плотность тока вытягиваемых ионов и одновременно увеличив напряжение фокусирующего электрода для уменьшения радиуса пучка и, соответственно, уменьшения сферической аберрации. Однако штатный блок питания фокусирующего электрода, размещенный в экранированном объеме под потенциалом 700 кВ, не позволяет повысить напряжение. Расстояние от плоскости старта пучка до первой сетки S1 — 480 мм, между сетками S1 и S2 — 500 мм.

На рис. 2–8 показаны траектории ионов углерода  $C^{+5}$  и фазовые портреты пучка для каждого участка ИОС ускорительной трубки.

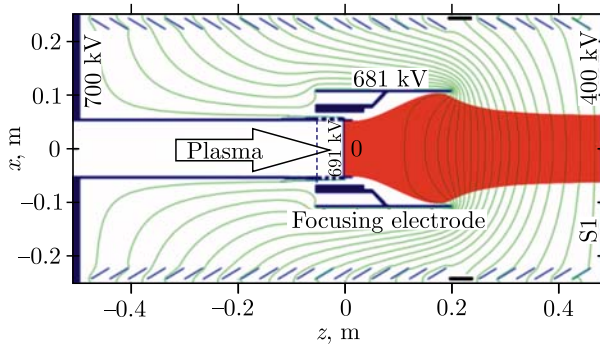


Рис. 2. Пучок ионов углерода и эквипотенциалы на первом участке ИОС

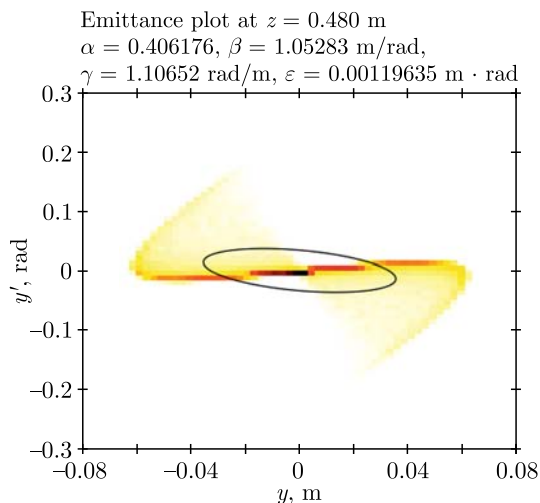


Рис. 3. Фазовый портрет пучка на выходе первого участка

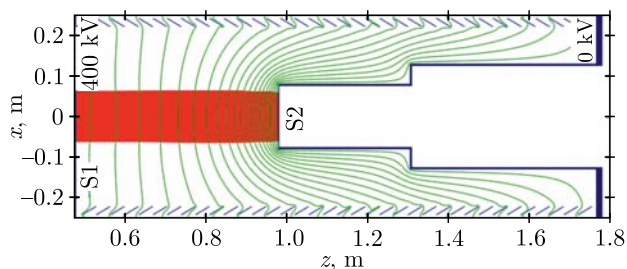


Рис. 4. Пучок ионов углерода и эквипотенциали на втором участке ИОС

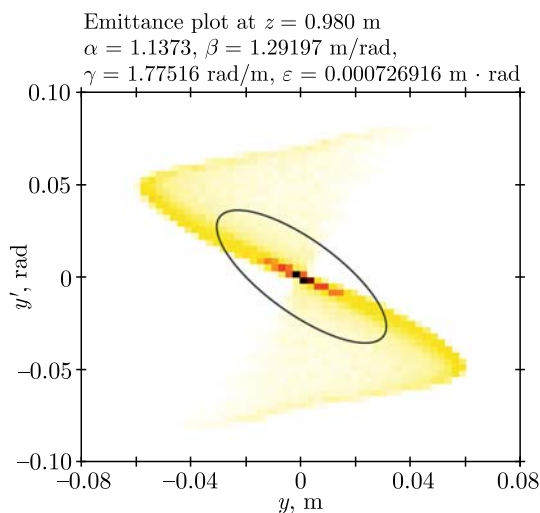


Рис. 5. Фазовый портрет пучка на выходе второго участка

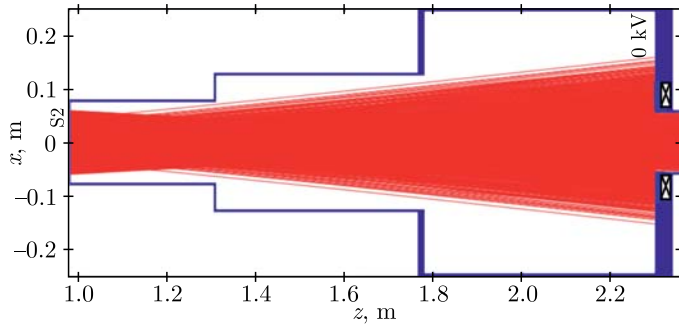


Рис. 6. Траектории ионов углерода на третьем участке ИОС

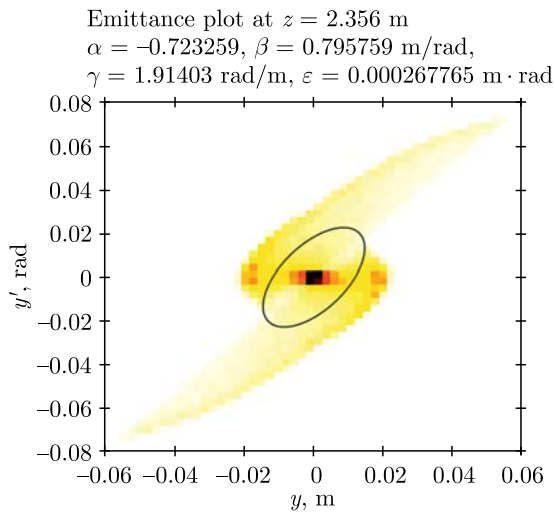


Рис. 7. Фазовый портрет пучка на выходе УТ

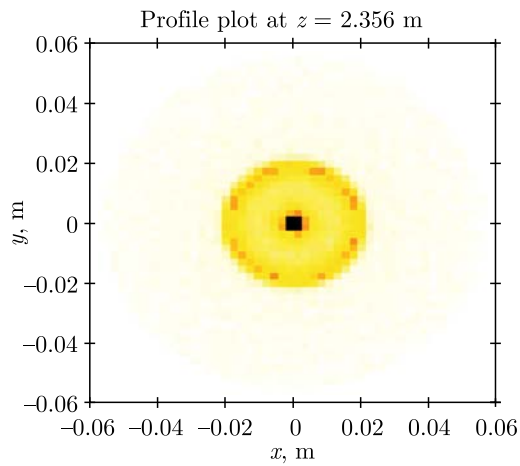


Рис. 8. Профиль пучка на выходе УТ

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЧКА В СОЛЕНОИДЕ

Для увеличения токопрохождения пучка на участке дрейфа длиной 1,7 м от ускорительной трубки до входа в согласующий канал из квадрупольных линз был рассмотрен вариант фокусировки пучка на этом участке с помощью соленоида. Длина соленоида — 610 мм, внутренний диаметр — 115 мм, число витков — 360. 3D-моделирование проводилось с учетом пространственного заряда и неоднородного распределения магнитного поля для нескольких значений поля. Программа IBSimu позволяет рассчитывать только электростатические поля. Поле соленоида рассчитывалось с помощью программы ANSYS, и данные магнитного поля использовались в IBSimu. При моделировании ток ионов  $C^{+5}$  на входе в канал транспортировки с соленоидом равнялся 470 мА. На рис. 7 приведен фазовый портрет пучка на выходе УТ. Нормализованный 4rms-эмиттанс пучка ионов углерода  $C^{+5}$  в плоскости, отстоящей на 2 см от выходного фланца ускорительной трубки, составил  $2,67 \text{ см} \cdot \text{мрад}$ . На рис. 9–14 показаны траектории ионов углерода  $C^{+5}$  и фазовые портреты пучка на входе в квадрупольный канал при значениях магнитного поля соленоида  $B = 0$  и  $B = 0,74 \text{ Тл}$  (ток в обмотках соленоида  $I_S = 1000 \text{ А}$ ).

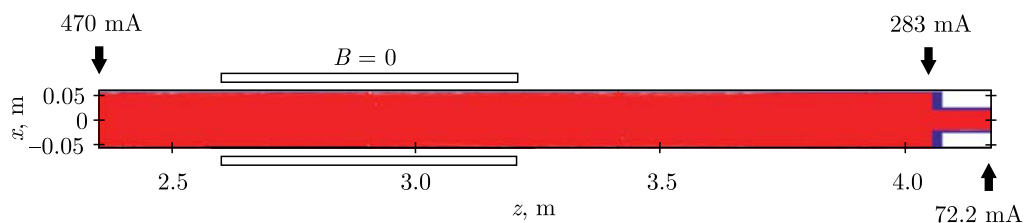


Рис. 9. Пучок ионов углерода в канале транспортировки без магнитного поля

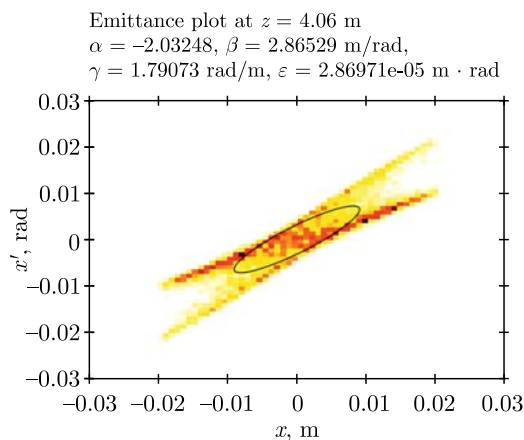


Рис. 10. Фазовый портрет пучка на входе в квадрупольный канал при  $B = 0$

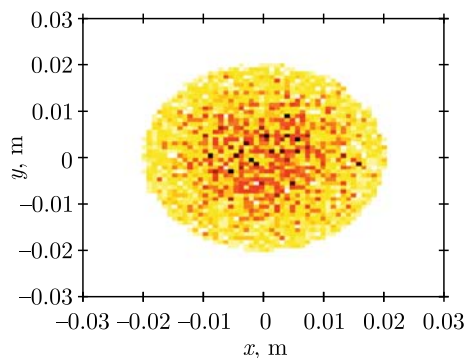


Рис. 11. Профиль пучка на входе в квадрупольный канал при  $B = 0$

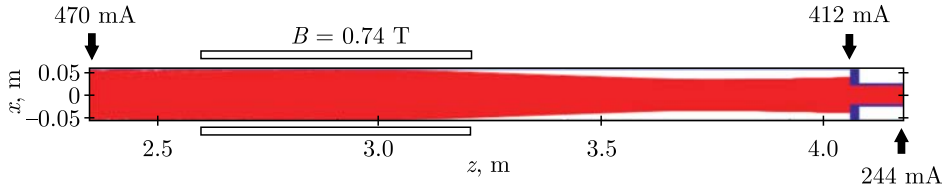


Рис. 12. Пучок ионов углерода в канале транспортировки при величине магнитного поля  $B = 0,74$  Тл

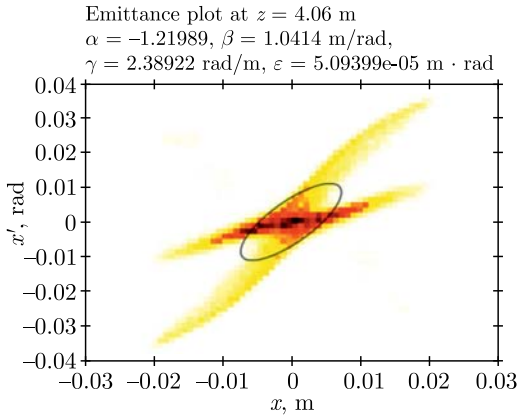


Рис. 13. Фазовый портрет пучка на входе в квадрупольный канал при  $B = 0,74$  Тл

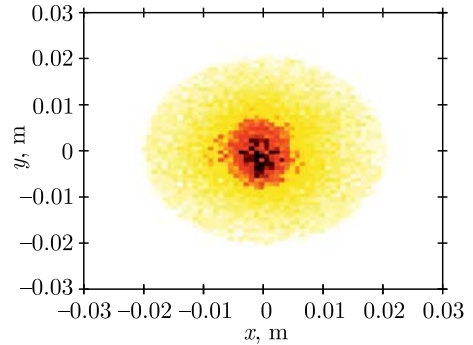


Рис. 14. Профиль пучка на входе в квадрупольный канал при  $B = 0,74$  Тл

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЧКА В КАНАЛЕ СОГЛАСОВАНИЯ ИЗ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ

После соленоида фокусировка пучка осуществлялась парой квадрупольных дуплетов. Схема включения согласующего канала ФДДФ. Длина каждой квадрупольной линзы — 67 мм. Расстояние между квадрупольными линзами в дуплетах — 11 мм, между дуплетами — 275 мм, радиус квадрупольных линз — 22 мм. Численное моделирование в квадрупольном канале проводилось с помощью программы PathManager. В качестве исходных данных использовались фазовые координаты пучка, полученные в результате моделирования на выходе соленоида и дрейфового промежутка. Длина дрейфового промежутка от последней линзы второго дуплета до фланца И-100 — 40 мм. Диаметр апертуры трубки дрейфа на входе в И-100 равен 20 мм. На квадрупольные линзы первого дуплета подается напряжение от одного источника питания с ограниченным максимальным током (градиенты магнитных полей линз в первом дуплете равны  $G_1 = G_2 = 12,5$  Тл/м). Питание линз второго дуплета осуществлялось отдельно и с регулируемой величиной тока. На рис. 15–20 приведены результаты моделирования пучка в квадрупольном канале при значениях магнитного поля соленоида в канале транспортировки:  $B = 0$  и  $B = 0,74$  Тл. На этих рисунках показаны 4gms-эллипсы и распределения частиц по фазовым координатам, а также зависимости среднеквадратичного радиуса пучка в согласующем канале от его длины с учетом дрейфового промежутка от последнего квадрупольного до входа в И-100.

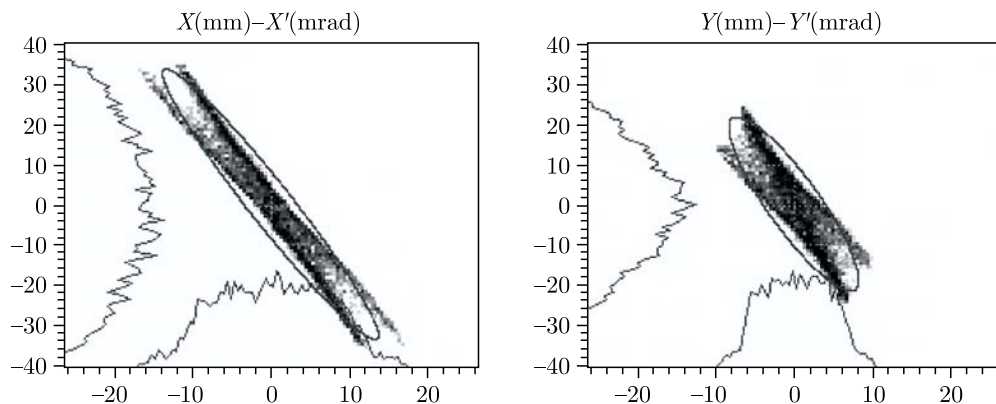


Рис. 15. Фазовые портреты пучка на выходе квадрупольного канала при  $B = 0$

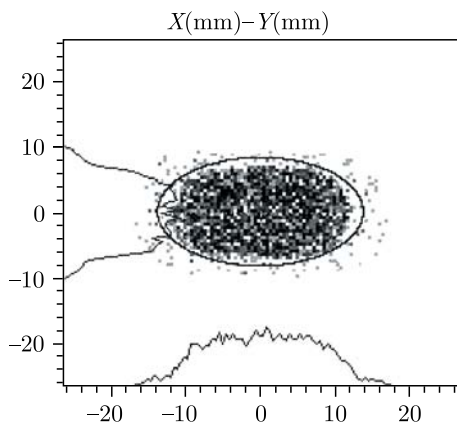


Рис. 16. Профиль пучка на выходе квадрупольного канала при  $B = 0$

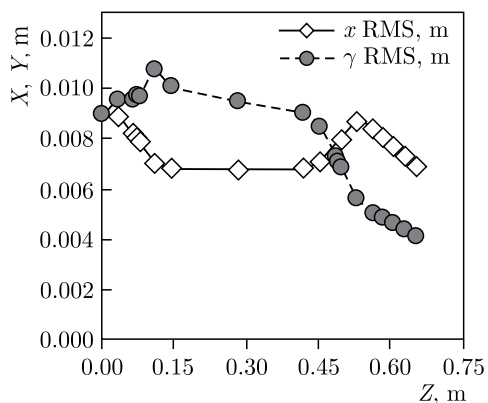


Рис. 17. Зависимость средневквдратичного радиуса в квадрупольном канале при  $B = 0$

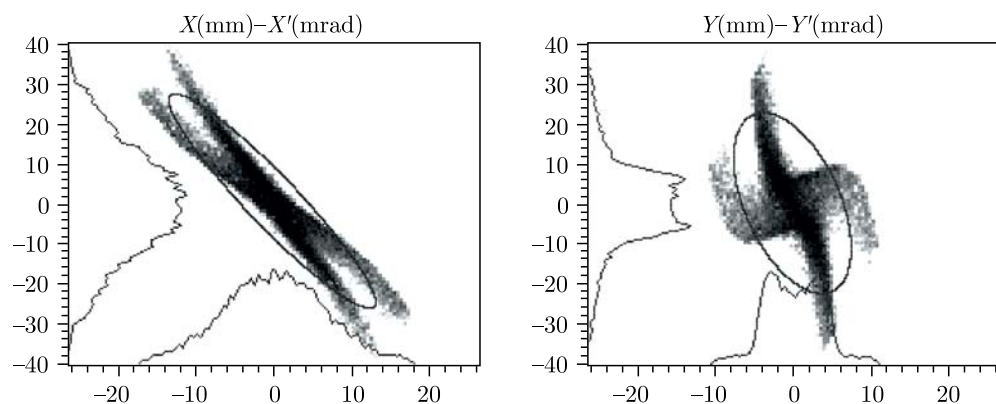


Рис. 18. Фазовые портреты пучка на выходе квадрупольного канала при  $B = 0,74$  Тл



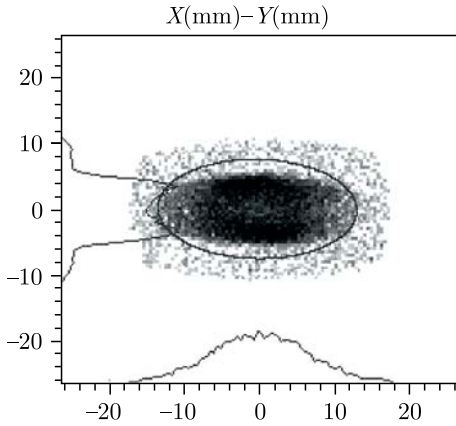


Рис. 19. Профиль пучка на выходе квадрупольного канала при  $B = 0,74$  Тл

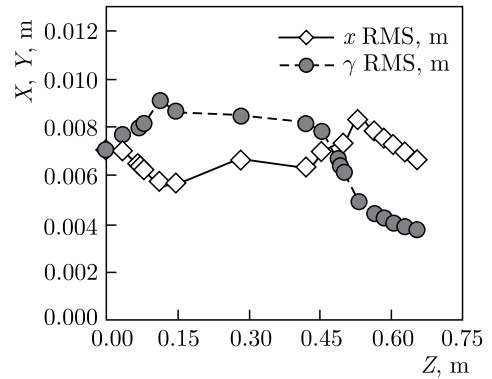


Рис. 20. Зависимость среднеквадратичного радиуса в квадрупольном канале при  $B = 0,74$  Тл

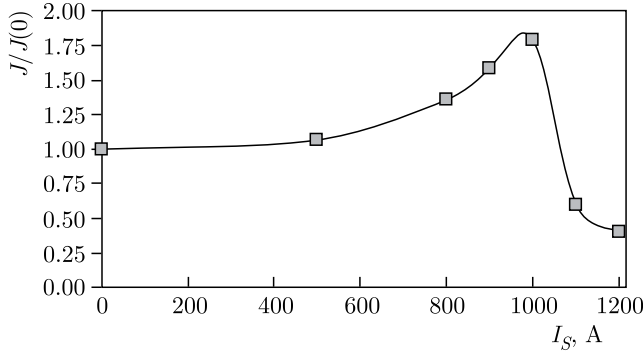


Рис. 21. Зависимость относительной яркости пучка ионов  $C^{+5}$  на входе в И-100 от тока в обмотках соленоида

Проведенные численные расчеты показали, что магнитное поле на участке дрейфа от ускорительной трубки до входа в канал согласования из квадрупольных линз фокусирует пучок и уменьшает потери. Выполненные ранее эксперименты при величине тока соленоида  $I_S = 500$  А показали, что ток пучка на выходе И-100 при включении соленоида практически не изменился. При расчетах установлено, что при токе соленоида  $I_S = 500$  А ток пучка  $I$  на входе И-100 возрастает более чем на 30%, однако яркость пучка  $J(I_S) = I / (\varepsilon_{x,n4rms} \cdot \varepsilon_{y,n4rms})$  увеличивается незначительно по сравнению с вариантом  $J(0)$ . Относительная яркость  $J(500)/J(0) = 1,07$ . С увеличением тока соленоида ситуация меняется. На рис. 21 приведен график зависимости относительной яркости пучка на входе в И-100  $J(I_S)/J(0)$  от силы тока в обмотках соленоида. При токе соленоида  $I_S = 1000$  А яркость пучка существенно возрастает и достигает максимума:  $J(1000)/J(0) = 1,77$ .

В таблице приведены значения магнитного поля соленоида  $B$  (в скобках указана сила тока в его обмотках  $I_S$ ), токи пучка ионов  $C^{+5}$  на входе и выходе квадрупольного канала  $I_{in}$  и  $I_{out}$ , градиенты магнитных полей квадрупольных линз  $G_1 - G_4$ , величины

**Параметры пучка на входе в И-100**

$B$ , Тл ( $I_S$ , А)	$I_{in}$ , мА	$I_{out}$ , мА	$G_1-G_4$ , Тл/м	$\varepsilon_{x,n4rms}$ , $\varepsilon_{y,n4rms}$ , см · мрад	$J(I_S)/J(0)$
0 (0)	72,2	58,8	12,5, -12,5, -14, 17	0,284 0,215	1
0,370 (500)	101	81,5	12,5, -12,5, -14,5, 17	0,319 0,248	1,07
0,592 (800)	184	148	12,5, -12,5, -16,5, 19	0,353 0,320	1,36
0,670 (900)	234	187	12,5, -12,5, -16,5, 19,5	0,347 0,353	1,58
0,740 (1000)	244	186	12,5, -12,5, -17,5, 20	0,295 0,369	1,77
0,814 (1100)	262	165	12,5, -12,5, -18,5, 20,5	0,434 0,650	0,61
0,888 (1200)	221	105	12,5, -12,5, -19, 21	0,468 0,590	0,40

нормализованных 4rms-эммитансов в  $x$ - и  $y$ -плоскостях на входе в первую трубку дрейфа И-100, относительная яркость пучка для разных значений магнитного поля соленоида  $J(I_S)/J(0)$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты показали, что магнитное поле на участке дрейфа от ускорительной трубки до входа в канал согласования из квадрупольных линз фокусирует пучок и уменьшает его потери в ионно-оптическом инжекционном канале. При создании и усовершенствовании источников ионов, а источником для ускорителя И-100 является вся система инъекции, огромное значение придается получению высоких значений яркости пучка. Расчеты показали, что для повышения яркости пучка необходимо повысить силу тока в обмотках соленоида до 1000 А. Увеличение тока соленоида до величин порядка 1000 А требует проведения дополнительных работ, но технически вполне возможно. При достижении таких токов в соленоиде значительно повышается яркость пучка на выходе инжекционного комплекса, что создает условия для инъекции и ускорения в И-100 существенно большего тока ионов углерода.

Авторы выражают благодарность Ю. М. Антипову за обсуждение работы и ценные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов Ю. М., Солдатов А. П. Создание центра ионно-лучевой терапии // Мед. физика. 2016. №2(70). С. 5–9.
2. Центр ионной лучевой терапии на базе ускорительного комплекса У-70. [http://www.ihep.su/files/Journal\\_2017\\_Final\\_2\\_05\\_02\\_2018.pdf](http://www.ihep.su/files/Journal_2017_Final_2_05_02_2018.pdf).

3. *Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Ärje J., Clark H.* IBSimu: A Three-Dimensional Simulation Software for Charged Particle Optics // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81, Iss. 2. P. 02B703.
4. *Kalvas T., Welton R. F., Tarvainen O., Han B. X., Stockli M. P.* Simulation of H-Ion Source Extraction Systems for the Spallation Neutron Source with IBSimu // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. V. 83, Iss. 2. P. 02A705.
5. *Middtun Ø., Kalvas T., Kronberger M., Lettry J., Pereira H., Schmitzer C., Scrivens R.* A New Extraction System for the Linac4 H-Ion Source // *Ibid.* P. 02B710.
6. *Valerio-Lizarraga C. A., Lallement J.-B., Leon-Monzon I., Lettry J., Middtun Ø., Scrivens R.* Space Charge Compensation in the Linac4 Low Energy Beam Transport Line with Negative Hydrogen Ions // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. V. 85, Iss. 2. P. 02A505.
7. *Fink D. A., Kalvas T., Lettry J., Middtun Ø., Noll D. M.* H-Extraction Systems for CERN's Linac4 H-Ion Source // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2018. V. 904. P. 179–187.
8. *Капчинский И. М., Мальцев А. П., Плотников В. К.* Расчетные значения физических параметров линейного ускорителя И-100. Препринт ИФВЭ ИНЖ 67-38. Серпухов, 1967. 54 с.
9. *Антипов Ю. М., Фролов Б. А., Горин Ю. П. и др.* Ускорение ионов в линейном ускорителе И-100 // *Тр. XVII Совещ. по ускор. заряж. частиц.* Протвино, 2000. Т. 2. С. 385–389.
10. *Антипов Ю. М., Анферов Н. Е., Батарин В. А. и др.* Работы по созданию центра протонной лучевой терапии в ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2001-52. Протвино, 2001. 8 с.

Получено 17 августа 2021 г.