

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 539.1.05

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА СИЛЬНОТОЧНОГО ИНЖЕКТОРА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ НА БАЗЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ

© 2022 г. А. В. Зиятдинова^{а, *}, П. А. Федин^а, Т. В. Кулевой^а, А. А. Малышев^а,
С. Л. Богомолов^б, А. А. Ефремов^б

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

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: bishazi@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.12.2021 г.

После доработки 30.12.2021 г.

Принята к публикации 12.01.2022 г.

Работа посвящена разработке системы анализа и транспортировки пучка сильноточного инжектора многозарядных ионов на базе сверхпроводящего ЭЦР источника ионов, разрабатываемого в ОИЯИ в рамках программы исследования сверхтяжелых элементов. В работе описано моделирование динамики ионных пучков в разрабатываемой системе в приближении “идеальных” полей в оптических элементах тракта.

Ключевые слова: моделирование динамики, ионный пучок, ЭЦР источник

DOI: 10.56304/S2079562922030599

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ развивается программа исследования сверхтяжелых элементов (СТЭ). Базовой установкой фабрики СТЭ является циклотрон ДЦ-280 [1]. Для генерации сильноточных пучков тяжелых ионов в качестве инжектора для данного ускорителя в ОИЯИ разрабатывается сверхпроводящий источник ионов типа ЭЦР (электронно-циклотронный резонанс) третьего поколения. Для инъекции пучка ионов в циклотрон необходимо разработать систему транспортировки и анализа пучков. Разработка концептуальной схемы инжектора основывается на моделировании динамики пучков тяжелых ионов. В работе представлены первые результаты такого моделирования.

1. ВЫБОР НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Выбор начальных параметров для моделирования динамики пучков ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ был основан на результатах работ [2, 3], в которых описаны измерения и моделирование пучка для работающих сегодня ЭЦР источников третьего поколения — SECRAI, SECRAI II. Нормализованный RMS эмиттанс пучков $^{238}\text{U}^{34+}$ и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ для моделирования принят 0.3π мм мрад. Напряжение экстракции 25 кВ.

Для оценки эффективности сепарации использован метод одновременного моделирования двух пучков ионов с близкими значениями A/Z .

Предварительная схема компоновки канала транспортировки была выбрана на основе имеющихся элементов транспортных каналов [1–5]. Основные элементы канала транспортировки: соленоид, поворотный магнит, три квадрупольные линзы и ускорительная трубка. Размеры соленоида были выбраны на основе разработанного в ОИЯИ и хорошо себя зарекомендовавшего соленоида [6]. Поворотный магнит был выбран с углом поворота 90° , радиусом поворота 500 мм и углами скоса по 26° по аналогии с [4, 5]. Длина квадрупольных линз была определена из работы [4]. В качестве ускорительной трубки была выбрана трубка, выпускаемая фирмой NEC на предельную разность потенциалов 100 кВ [7]. Для обеспечения контроля за параметрами пучка в канале транспортировки предусмотрено два места для измерительных блоков. Один длиной 400 мм на выходе источника, и второй длиной 500 мм за поворотным магнитом. Также в канале предусмотрено пространство для установки вертикального корректора после магнита.

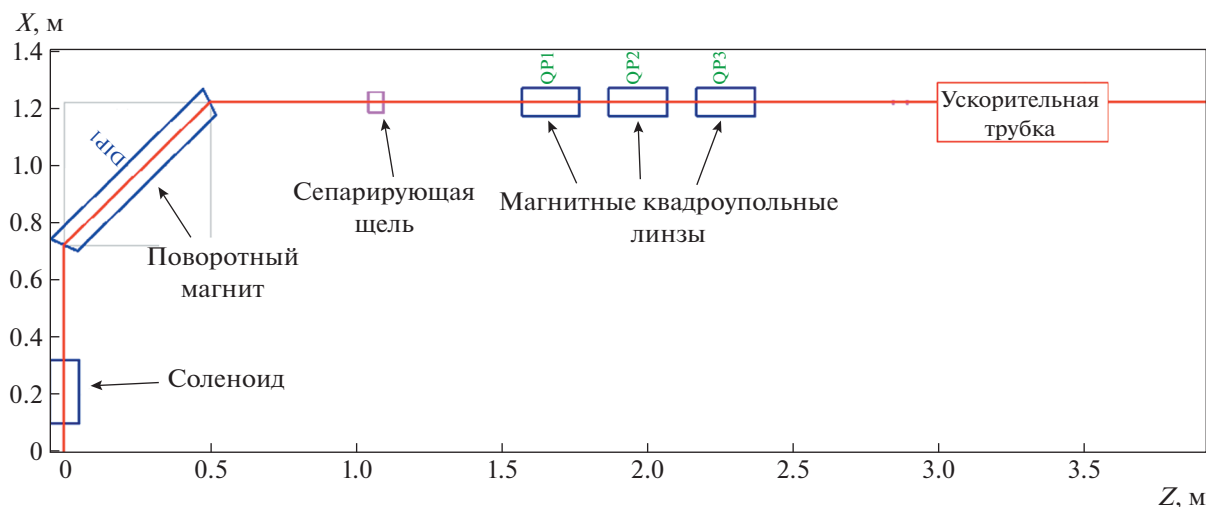


Рис. 1. Схема канала транспортировки, выбранная по результатам моделирования динамики пучка с нулевым током.

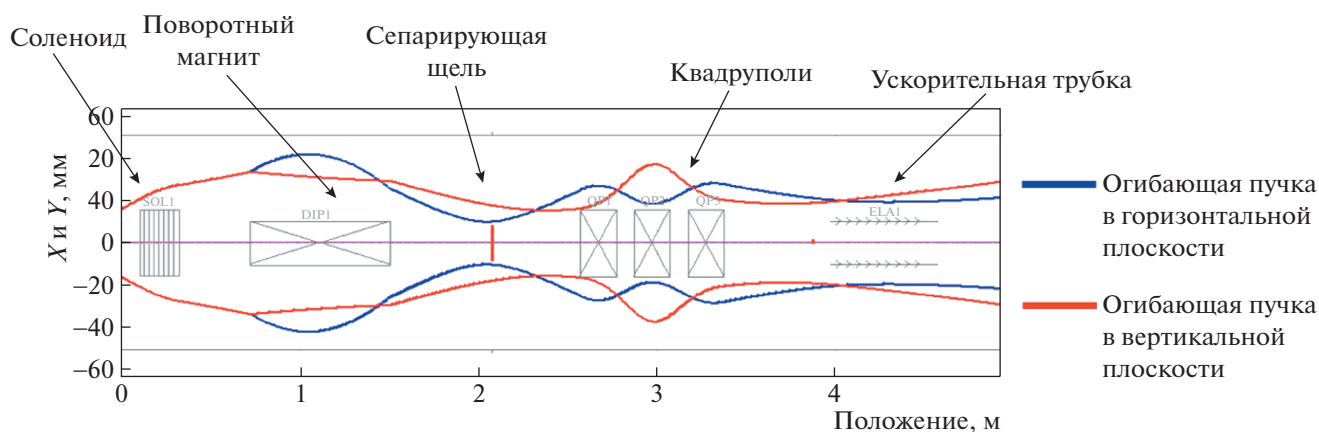


Рис. 2. Огибающие пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА С НУЛЕВЫМ ТОКОМ

На начальном этапе моделирование динамики пучка проводилось в идеальном приближении электромагнитных полей элементов транспортного канала и при наличии полной компенсации пространственного заряда (нулевой ток). На этом этапе определялось место расположения ключевых элементов канала анализа и транспортировки пучка и проводилась предварительная оптимизация их параметров.

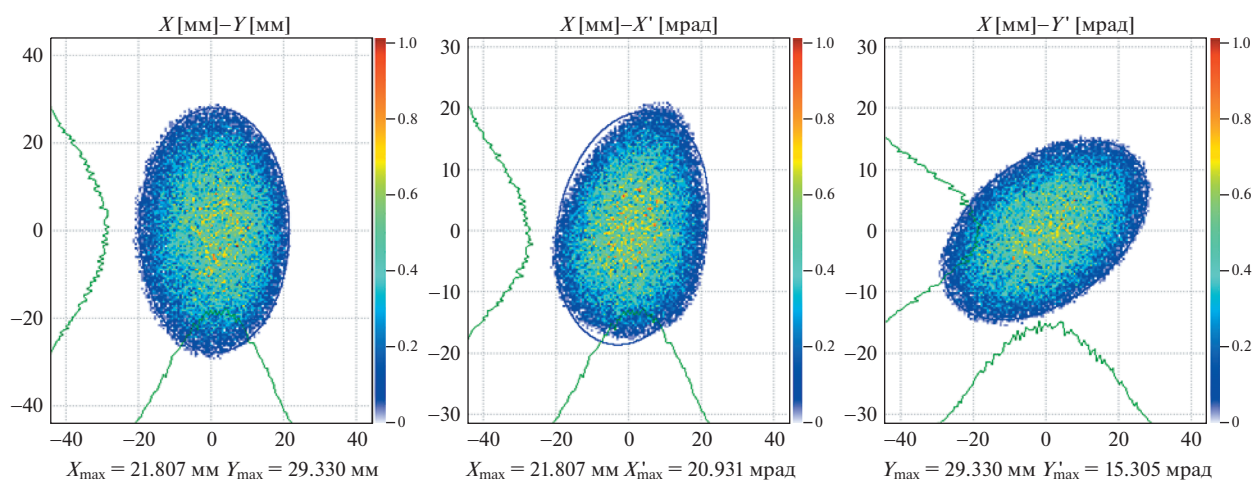
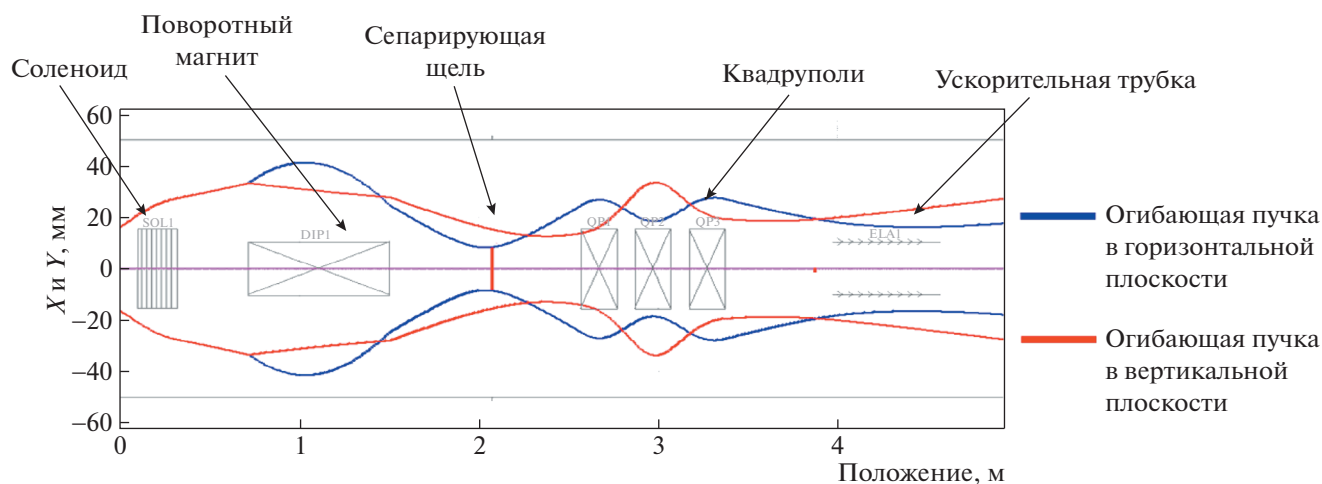
При этом преследовалась цель обеспечить проводку пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ с минимальными потерями и максимально уменьшить примесную составляющую. В качестве примесного для моделирования рассматривался ион $^{238}\text{U}^{35+}$.

В результате проведенного моделирования сформирован канал, представленный на рис. 1. Сепарирующая щель находится на расстоянии

570 мм от магнита и имеет прямоугольную форму с размерами 25×100 мм. При этом основным пучок $^{238}\text{U}^{34+}$ проходит сепарирующую щель без потерь, а примесный ион $^{238}\text{U}^{35+}$ теряет на диафрагме 93% своей интенсивности. Полная сепарация (100% потеря примесного пучка $^{238}\text{U}^{35+}$) достигается при уменьшении щели диафрагмы до 18 мм. Потери основного пучка в диафрагме при этом достигают 7%. На рис. 2 показаны огибающие пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале. На рис. 3 показаны профиль и эмиттансы пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ на выходе из канала.

В табл. 1 приведены значения поля и градиента поля для магнитных элементов канала, использованных при моделировании динамики пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$. Эффективная длина квадрупольных линз 200 мм. Эффективная длина соленоида 220 мм.

В разработанном канале проведено моделирование динамики опорного пучка $^{40}\text{Ar}^{8+}$ и примес-

Рис. 3. Профиль и эмиттансы пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ на выходе из канала.Рис. 4. Огибающие пучка $^{40}\text{Ag}^{8+}$ в канале.

ного пучка $^{40}\text{Ag}^{9+}$ с начальными данными на входе в канал, аналогичными $^{238}\text{U}^{34+}$. Транспорт пучка ионов $^{40}\text{Ag}^{8+}$ составил 100%. Потери примесного $^{40}\text{Ag}^{9+}$, составили 100% еще до сепарирующей диафрагмы. На рис. 4 показаны огибающие пучка $^{40}\text{Ag}^{8+}$ в канале. На рис. 5 показаны профиль и эмиттансы пучка $^{40}\text{Ag}^{8+}$ на выходе из канала.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ С НЕНУЛЕВЫМ ТОКОМ

После определения расстановки элементов транспортной системы в приближении идеальных полей и при полной компенсации собственного заряда пучка проведено моделирование динамики пучка при условии, когда полная компенсация

Таблица 1. Значения поля и градиента поля для магнитных элементов канала, использованных при моделировании

	Поле соленоида, Тл	Градиент первой линзы, Тл/м	Градиент второй линзы, Тл/м	Градиент третьей линзы, Тл/м
U_{238}^{34+}	0.3	0.97	-1.22	0.68
Ag_{40}^{8+}	0.254	0.822	-1.03	0.576

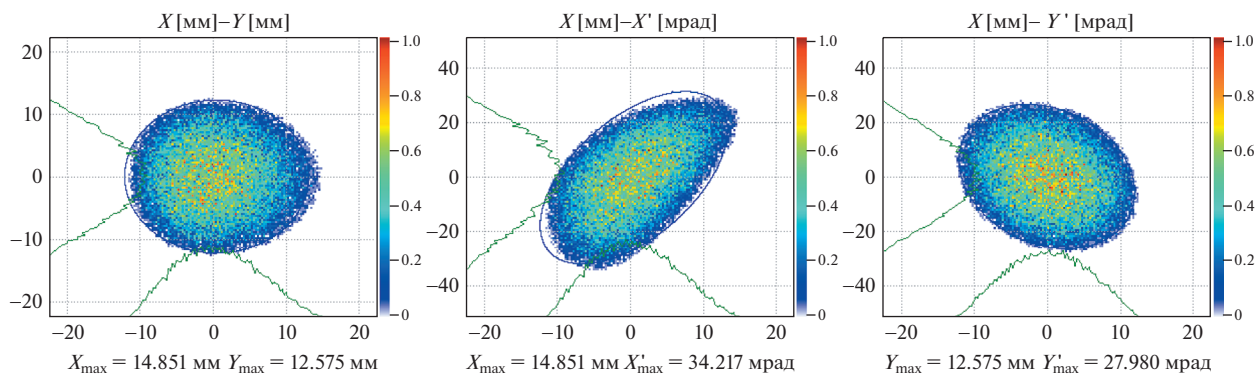


Рис. 5. Профиль и эмиттансы пучка $^{40}\text{Ar}^{8+}$ на выходе из канала.

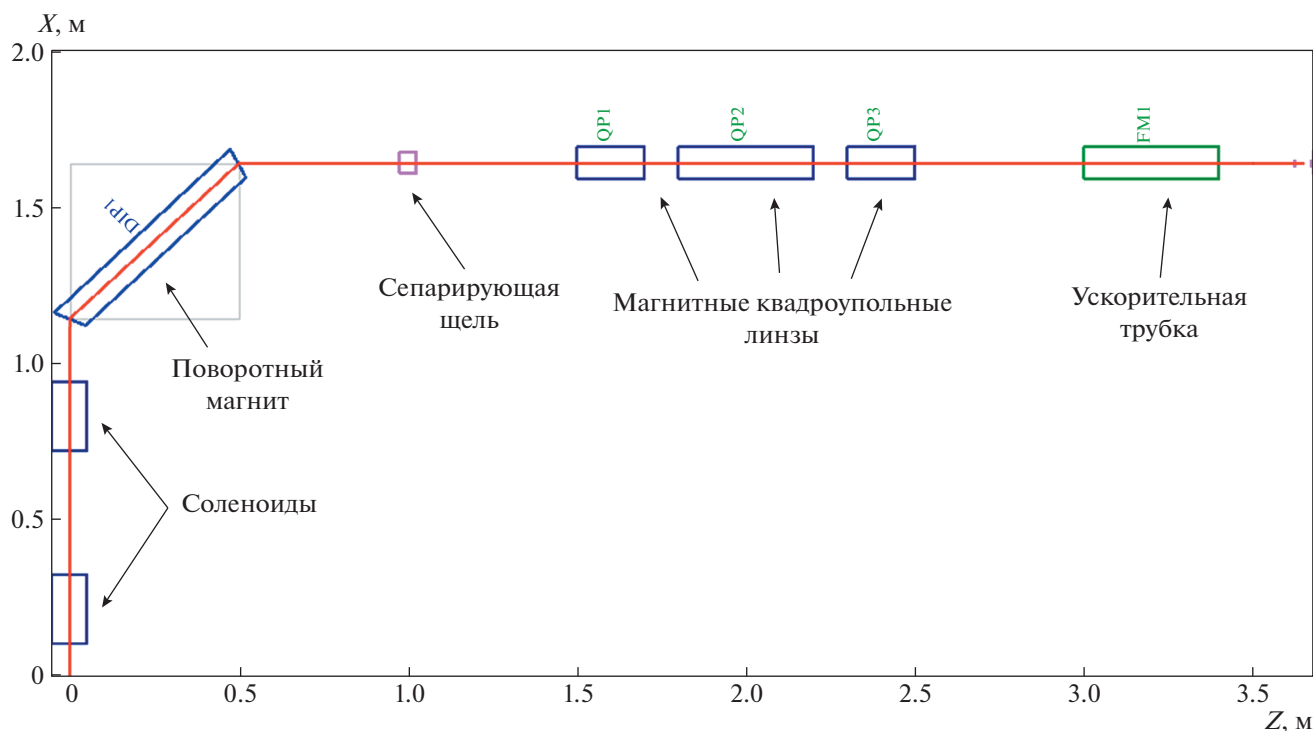


Рис. 6. Схема канала с двумя соленоидами перед поворотным магнитом.

пространственного заряда пучка не достигается. При этом моделирование в канале до поворотного магнита проводилось для единственного типа ионов, но с током 20 мА и компенсацией 70%. Также для учета потерь примесных ионов в поворотном магните использовано следующее приближение: на входе в поворотный магнит ток пучка падает до значения 1 мА (считаем, что это значение тока пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$, т.е. около 5% от общего тока всего пучка [3]).

При проведении моделирования динамики пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ с неполной компенсацией собствен-

ного заряда не удастся обеспечить полное прохождение пучка через транспортную систему с использованием единственного соленоида. Поэтому на этом участке был добавлен еще один соленоид. На рис. 6 приведена скорректированная схема канала с двумя соленоидами перед поворотным магнитом, полученная по результатам моделирования динамики пучка $^{238}\text{U}^{34+}$. На рис. 7 показаны огибающие пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале. На рис. 8 показан график потерь пучка $^{238}\text{U}^{34+}$.

В табл. 2 приведены значения поля и градиента поля для магнитных элементов канала, использо-

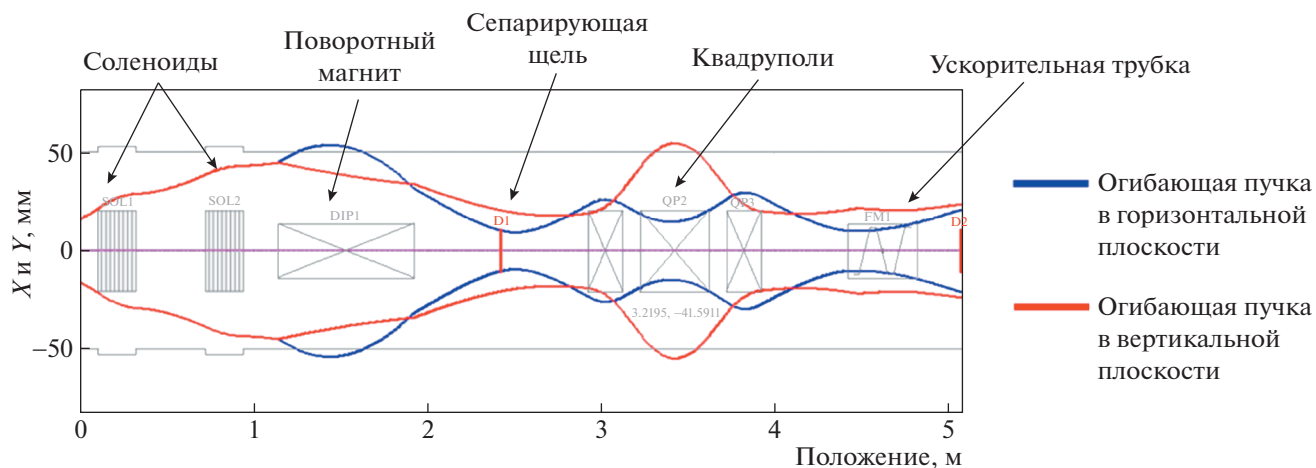


Рис. 7. Огибающие пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале с двумя соленоидами перед диполем (синяя огибающая в горизонтальной плоскости, красная огибающая в вертикальной плоскости).

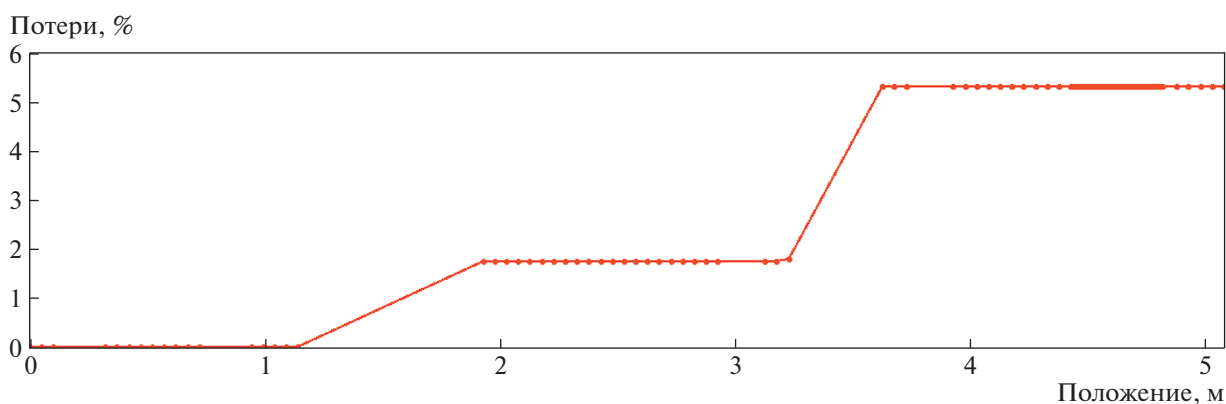


Рис. 8. График потерь пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале с двумя соленоидами перед диполем (без учета потерь на диафрагме).

ванных при моделировании динамики пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$. Эффективная длина квадрупольных линз 200, 400 и 200 мм. Эффективная длина соленоидов 220 мм.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- потери основного пучка $^{238}\text{U}^{34+}$ в данной компоновке канала составляют около 6%;

- потери примесного пучка $^{238}\text{U}^{35+}$ при этом составляют около 37%, т.е. заметная часть примесного пучка доходит до ускоряющей трубки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе разработки концептуального проекта системы транспортировки и анализа пучка мно-

Таблица 2. Значения поля и градиента поля для магнитных элементов канала, использованных при моделировании

	Поле соленоида 1, Тл	Поле соленоида 2, Тл	Градиент первой линзы, Тл/м	Градиент второй линзы, Тл/м	Градиент третьей линзы, Тл/м
U_{238}^{34+}	0.48	0.29	0.82	-0.61	0.94

гозарядных ионов из сверхпроводящего ЭЦР источника была выбрана предварительная схема компоновки транспортного канала и проведено моделирование динамики опорных пучков ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ в приближении идеальных полей ионно-оптических элементов с током 20 мА при 100% компенсации пространственного заряда.

Транспортировка пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ в данной конфигурации канала составила 100%. Потери примесного пучка $^{238}\text{U}^{35+}$ при этом составили 93%.

В разработанном канале проведено моделирование динамики пучка ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$, транспортировка которого составила 100%. Потери примесного $^{40}\text{Ar}^{9+}$, составили 100% еще до сепарирующей диафрагмы.

Дальнейшая проработка системы опиралась на результаты транспортировки ионов урана. Было проведено моделирование динамики опорных пучков ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ в приближении идеальных полей ионно-оптических элементов с током 20 мА при 70% компенсации пространственного заряда.

Проводка пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ составила 94.5%, эффективность транспортировки ближайшего по массе иона $^{238}\text{U}^{35+}$ составила 62.5%. На

следующем этапе будет проводиться корректировка параметров системы анализа и транспортировки пучка с целью снижения потерь основного пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$, моделирование магнитных и электростатических полей элементов тракта и проведение моделирования динамики пучков с использованием “реального” распределения полей в данных элементах, полученных при моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Гульбекян Г.Г. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16. № 6 (225). С. 653–665.
2. Yang Y. et al. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. P. 110101.
3. Yang J.C. et al. // China. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2013. V. 317. P. 263.
4. Гульбекян Г.Г. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11. № 6 (190). С. 1181–1196.
5. Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю. // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11. № 6 (190). С. 1169–1180.
6. Гикал Б.Н. и др. Канал аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ. Р9-2006-39, Дубна, 2006.
7. <https://www.pelletron.com/wp-content/uploads/2017/02/Accel-Tubes-v2.pdf>.

LEBT Development for High Current Multicharged Ions Injector Based on SC ECR Ion Source

A. V. Ziatdinova¹, *, P. A. Fedin¹, T. V. Kulevoy¹, A. A. Malishev¹,
S. L. Bogomolov², and A. A. Efremov²

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

²Joint Institute for Nuclear Research, Moscow oblast, Dubna, 141980 Russia

*e-mail: bishazi@yandex.ru

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

Abstract—The work is devoted to the development of a low energy beam transport (LEBT) system for a high current multicharged ions injector based on a superconducting ECR ion source. ECR ion source is under development at JINR as part of superheavy element research program The LEBT includes a beam analysis system. The paper describes results of ion beams dynamic simulation in the LEBT with “ideal” field approximation for optic elements.

Keywords: beam dynamic simulation, ion beam, ECR ion source