

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ (НЕВТ)

*Е. Р. Хабибуллина<sup>а, б, 1</sup>, В. И. Николаев<sup>а</sup>, А. Л. Ситников<sup>а</sup>,  
О. С. Сергеева<sup>а</sup>, В. С. Скачков<sup>а</sup>, Г. Н. Кропачев<sup>а, в</sup>, Т. В. Кулевой<sup>а, б</sup>,  
А. И. Семенников<sup>а</sup>, А. С. Борисков<sup>в</sup>, М. А. Гузов<sup>в</sup>*

<sup>а</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

<sup>в</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ (Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики) разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа с энергией 4 МэВ/нуклон, рабочей частотой 162,5 МГц и током до 10 мА. Канал НЕВТ (канал транспортировки тяжелых ионов высокой энергии) предназначен для транспортировки пучка ускоренных ионов с  $A/Z = 4-8$  к мишени по обдирке ионов перед их инжекцией в бустер. Определены основные элементы канала и их параметры, обеспечивающие поперечную фокусировку пучка и минимизацию импульсного разброса частиц. Приведены результаты динамических расчетов в канале НЕВТ с использованием трехмерных моделей пространственного распределения магнитного поля квадрупольной линзы и электрического поля дебанчера.

The 4-MeV/u pulsed heavy ion linac at a 162.5-MHz repetition rate and a current of up to 10 mA is under development at the National Research Centre “Kurchatov Institute” – КСТЕР (Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics). The HEVT channel (high energy transport channel of heavy ions) is designed to transport accelerated ions with  $A/Z = 4-8$  to the stripping target before their injection into the booster. The main elements of the channel and their parameters for ensuring transverse focusing of the beam and minimizing particles momentum spread are determined. The results of beam dynamics simulations are presented in the HEVT channel using 3D distributions of the quadrupole lens magnetic field and the debuncher electric field.

PACS: 29.20.-c; 25.27.-q

### ВВЕДЕНИЕ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа (ЛУ-2), который будет использован в качестве начальной части синхротронного комплекса исследований воздействия ионизирующих излучений космического пространства [1, 2]. ЛУ-2 состоит из

<sup>1</sup>E-mail: Ekaterina.Khabibullina@itep.ru

лазерно-плазменного источника ионов, секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и двух ускоряюще-фокусирующих каналов с трубками дрейфа (DTL), между которыми расположены каналы согласования (обеспечивающие 6-мерное согласование пучка). Канал НЕВТ осуществляет транспортировку ускоренного в ЛУ-2 пучка тяжелых ионов с  $A/Z = 4-8$ , энергией 4 МэВ/нуклон и током до 10 мА до мишени по обдирке ионов для последующей инъекции пучка в бустер. Общий эскиз канала представлен на рис. 1.

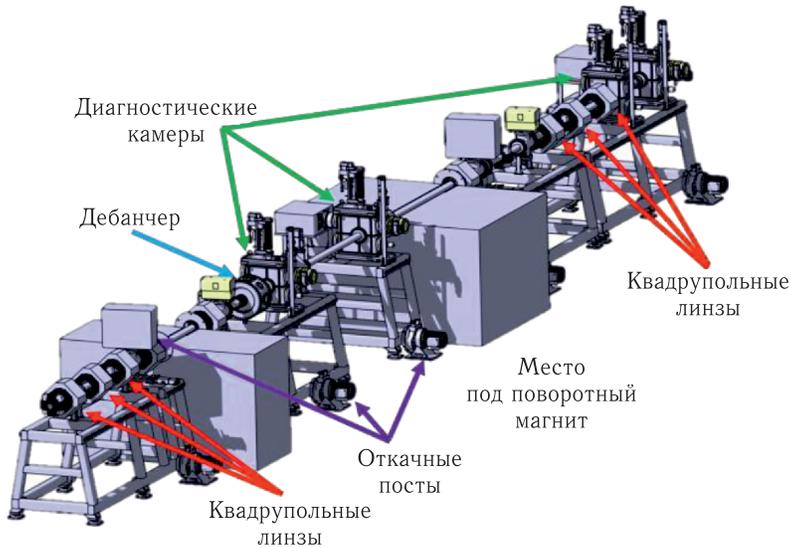


Рис. 1. Макет канала НЕВТ

Основными требованиями при разработке канала транспортировки НЕВТ являются:

- минимизация роста эмиттанса пучка;
- транспортировка ионного пучка без потерь частиц;
- уменьшение импульсного разброса частиц в пучке до  $\Delta p/p = \pm 0,5 \%$ ;
- установка в тракт дипольного магнита, транспортирующего пучок из линейного ускорителя легких ионов (ЛУ-1) до обдирочной мишени;
- учет при проектировании канала расположения биологической защитной стены, отделяющей зал ЛУ-2 от зала кольцевого ускорителя бустера.

Основные параметры пучка в НЕВТ представлены в табл. 1.

Магнитооптическая структура канала НЕВТ базируется на наборе одинаковых квадрупольных линз и состоит из трех самостоятельных участков (рис. 2).

1. «Регулярный» участок (Q5–Q8) — периодическая структура участка ФОДО. На входе в каждый период «регулярного» участка расчетные «параметры Твисса» повторяются.

2. Начальный участок (Q1–Q4) — согласование «параметров Твисса» на выходе из ЛУ-2 с «параметрами Твисса» на входе в «регулярный» участок.

Таблица 1. Основные параметры канала НЕВТ

Параметр	Значение
Отношение заряда к массе иона	$1/8 \leq Z/A \leq 1/4$
Энергия на выходе ЛУ-2, МэВ/нуклон	4
Ток пучка, мА	10
Относительная скорость	0,0925
Общая длина НЕВТ, м	18
Апертура канала, мм	$\varnothing 100$

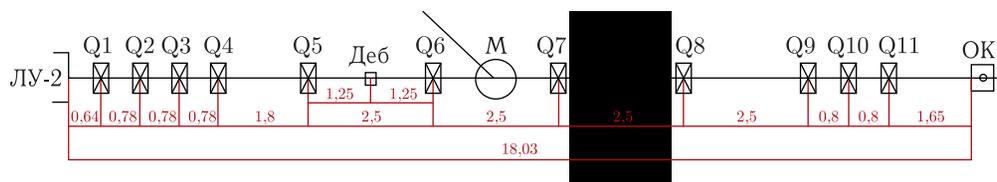


Рис. 2. Схема канала транспортировки ионов НЕВТ: ЛУ-2 — линейный ускоритель тяжелых ионов; Q1–Q11 — магнитные квадрупольные линзы; М — дипольный магнит; Деб — дебанчер; ОК — камера обдирки ионов; защитная стена обозначена черным цветом

3. Участок формирования (Q9–Q11) — фокусировка пучка на перезарядную мишень.

Для перевода пучка легких ионов из ЛУ-1 в канал НЕВТ между линзами Q6 и Q7 предусмотрено размещение дипольного магнита М.

Из-за того что защитная стена между помещениями бустера и линейных ускорителей имеет толщину 2 м, расстояние между центрами ближайших электромагнитных линз выбрано равным 2,5 м при длине линзы по полюсу 0,25 м.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В НЕВТ

**Поперечное согласование пучка.** В качестве начальных параметров пучка на входе в канал транспортировки НЕВТ использовались фазовые характеристики пучка на выходе ЛУ-2 для варианта  $A/Z = 8$  с энергией 4 МэВ/нуклон [3] (рис. 3).

С помощью программ MAD-X [4] и TraceWin [5] была проведена оценка расчета динамики пучка в приближении идеальных полей, в результате которого определены внутренний диаметр ионопровода  $\varnothing = 80$  мм и основные параметры квадрупольной линзы: магнитная апертура квадрупольной линзы  $\varnothing = 100$  мм, эффективная длина 300 мм, требуемые значения градиентов в них.

Конструкция магнитной квадрупольной линзы, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ, при индукции магнитного поля на полюсе 1 Тл обеспечивает максимальный градиент магнитного поля 20 Тл/м (материал Steel-1010 — электро-техническая низкоуглеродистая сталь). Проведен расчет 3D-распределения магнитного поля в ней [6].

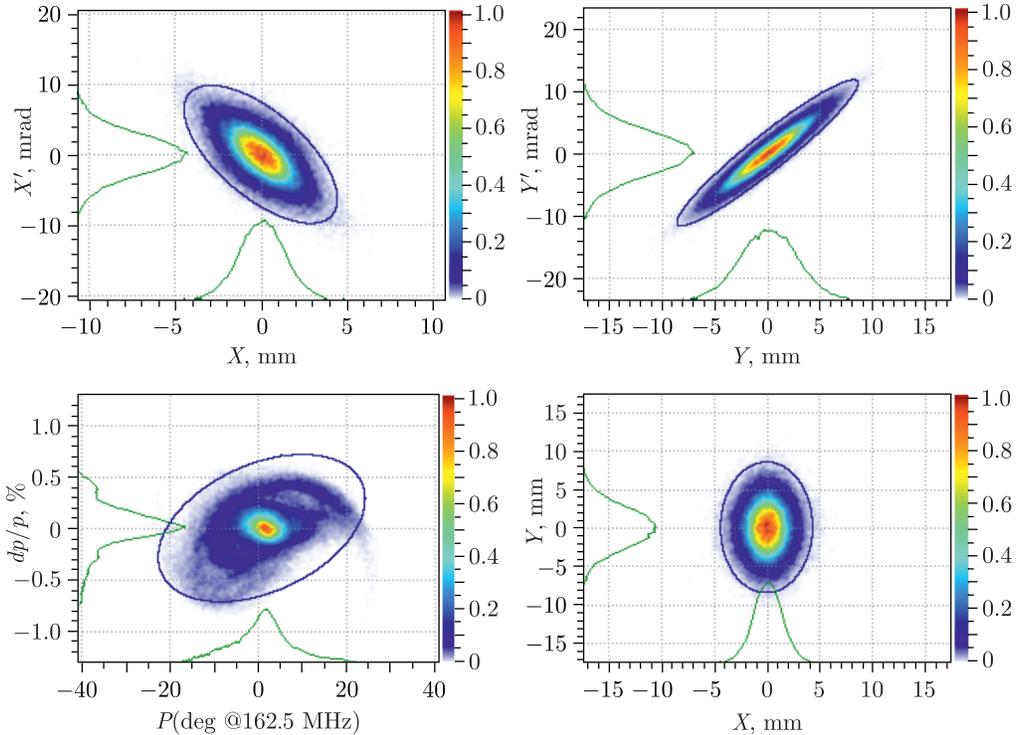


Рис. 3. Фазовый портрет пучка на выходе ЛУ-2

В результате моделирования динамики пучка с учетом трехмерной карты магнитного поля линз было получено: максимальный градиент магнитного поля в линзе на участке согласования — 11,55 Тл/м (для Q1), для «регулярного участка» — 3,8 Тл/м.

**Продольное согласование пучка.** Согласно расчетам на выходе ЛУ-2 разброс частиц по импульсу составляет  $\Delta p/p = \pm 0,8\%$ . По условиям технического задания требуется обеспечить импульсный разброс пучка ионов на входе в мишень по обдирке ионов не выше чем  $\pm 0,6\%$ . В качестве дебанчера был выбран двухзакорный резонатор, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ [7] (рис. 4).

Дебанчер работает на частоте 162,5 МГц, что соответствует частоте резонаторов DTL2. Он выбран как более компактный и более надежный в эксплуатации. Основные параметры дебанчера представлены в табл. 2. Максимальная напряженность поля 130 кВ/см на поверхности, что далеко от максимального значения напряженности поля по Килпатрику (245 кВ/см). Внешний радиус трубок дрейфа — 45 мм, внутренний — 25 мм, что позволяет транспортировать пучок с большим эмиттансом.

Установка в тракт дебанчера позволяет снизить разброс частиц по импульсу до  $\pm 0,3\%$ . После прохождения регулярного участка разброс по импульсу сохраняется, увеличивается протяженность сгустка по фазам.

Распределение плотности пучка в канале и фазовые портреты пучка на выходе приведены на рис. 5 и 6.

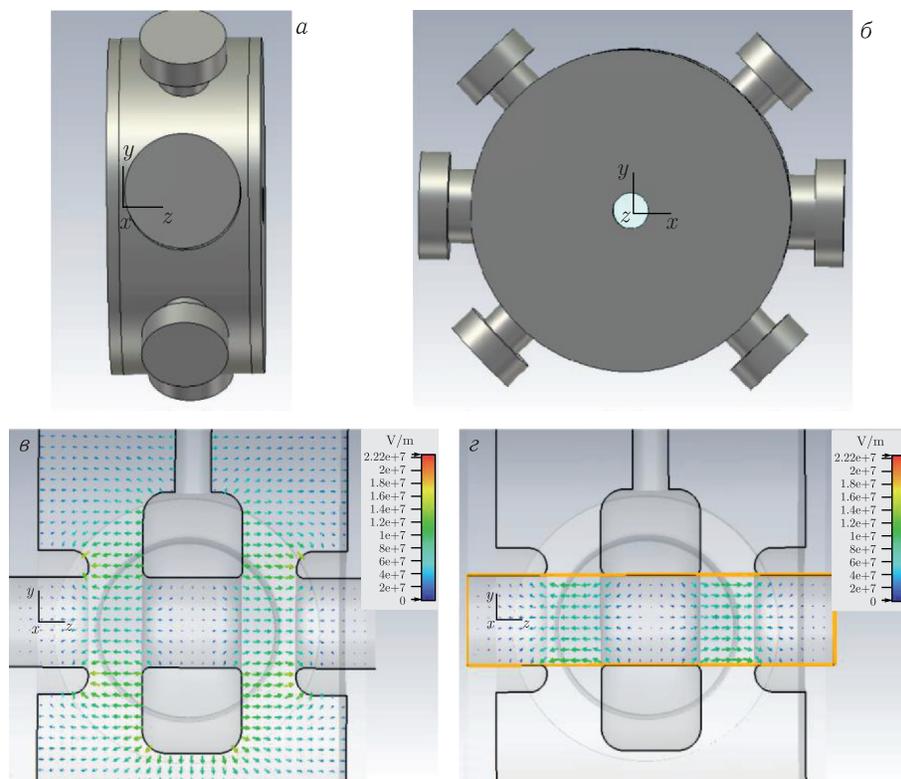


Рис. 4. а, б) Внешний вид дебанчера; в, г) распределение поля в дебанчере: внутри рабочей области (в); фронтальный разрез (г)

Таблица 2. Основные параметры дебанчера

Параметр	Значение
Частота, МГц	162,5
Внутренний радиус трубок дрейфа, мм	25
Внешний радиус трубок дрейфа, мм	45
Длина зазора, мм	30
Длина первой и третьей трубок дрейфа, мм	28
Длина первой и третьей трубок дрейфа с учетом фланца, мм	44
Длина второй трубки дрейфа, мм	55
Радиус скругления трубки дрейфа, мм	4
Максимальная напряженность поля на зазоре, кВ/см	48,5
Максимальная напряженность поля на поверхности, кВ/см	130

Для корректировки траектории движения пучка тяжелых ионов в начальной части НЕВТ предполагается расположить первую пару корректоров (первый корректор перед линзой Q1, второй (ответный) — между линзами Q2 и Q3). Вторая пара корректоров будет расположена за защитной стеной (между линзами Q8 и Q9 (первый

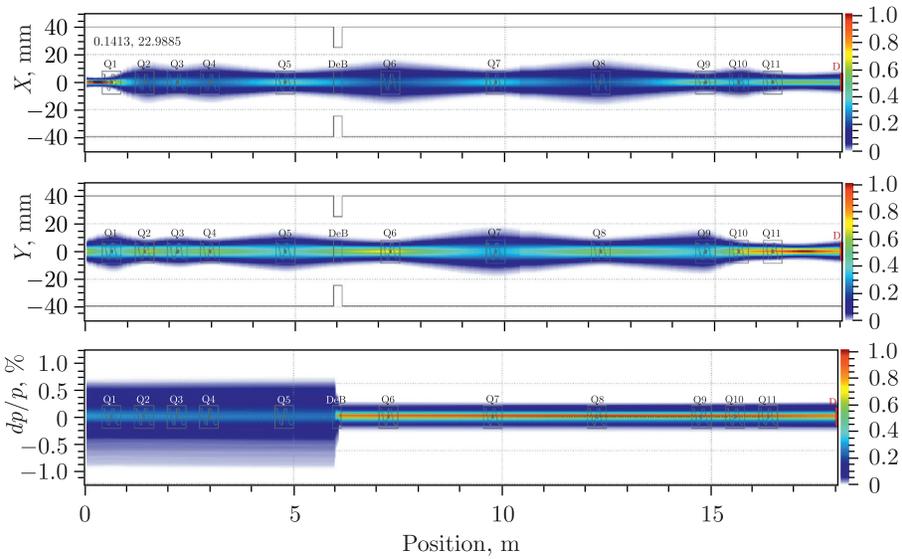


Рис. 5. Распределение плотности пучка в канале НЕВТ

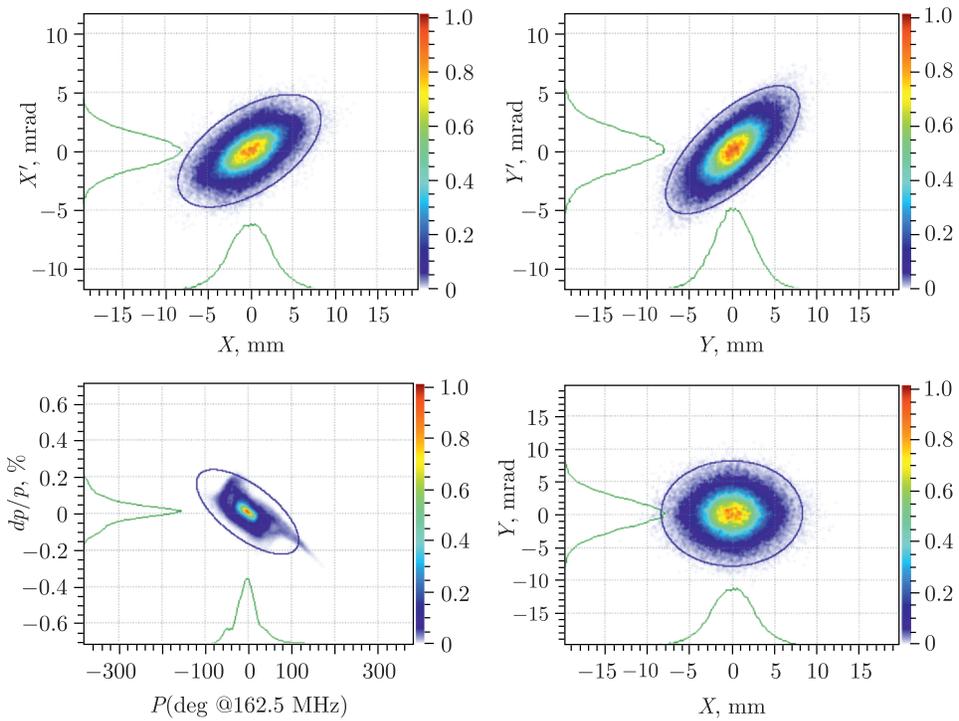


Рис. 6. Фазовый портрет пучка на выходе канала НЕВТ

корректор) и между линзами Q9 и Q10 (второй корректор)). Это необходимо для того, чтобы более точно сфокусировать пучок на перезарядную мишень и обеспечить дополнительное согласование пучка легких ионов, транспортируемых из ЛУ-1 через поворотный магнит, с оптической осью канала НЕВТ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании моделирования динамики пучка определена магнитооптическая структура канала НЕВТ, состоящая из 11 одинаковых магнитных квадрупольных линз и обеспечивающая транспортировку ионного пучка с энергией 4 МэВ/нуклон и отношением  $A/Z$  в диапазоне от 4 до 8 без потерь.

Для минимизации импульсного разброса частиц в пучке используется двухзоровый дебанчер, работающий на частоте 162,5 МГц. Он позволяет снизить разброс частиц в пучке по импульсу с  $\pm 0,8$  до  $\pm 0,3\%$ .

В канале НЕВТ предусмотрено место для установки дипольного магнита, предназначенного для перевода частиц, ускоренных в линейном ускорителе-инжекторе легких ионов.

С помощью двух независимых пар корректоров осуществляется дополнительная корректировка траектории движения пучка. Это позволяет произвести полное согласование между осью пучка легких/тяжелых ионов и оптической осью канала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завьялов Н. В.* Исследовательские установки РФЯЦ–ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // УФН. 2021. Т. 191, № 9.
2. *Будников Д. В. и др.* Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ–ВНИИТФ: настоящее и будущее // ВАНТ. Сер. «Физика ядерных реакторов». 2021. Т. В4. С. 5–25.
3. *Кропачев Г. Н. и др.* Динамика частиц в инжекторе тяжелых ионов ЛУ-2 для синхротронного испытательного комплекса (СКИ) // СФЖ. 2024. № 3 (в печати).
4. *Skowronski P. K.* Update on MAD-X and Future Plans // Proc. IPAC. 2009. P. 117–121.
5. *Uriot D., Pichoff N.* Status of TraceWin Code // Proc. of the 6th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2015), Richmond, VA, USA, May 2–8, 2015. P. 92–94.
6. *Кулевой Т. В. и др.* Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ-2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) // ПТЭ. 2024 (в печати).
7. *Ситников А. Л. и др.* Электродинамические характеристики ускоряющего двухзорового резонатора с трубками дрейфа // ПТЭ. 2024 (в печати).

Получено 15 сентября 2023 г.