

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.3.038.613

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПУЧКА И СЕТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ И-4

© 2024 г. А. А. Лосев<sup>а</sup>, \*, Г. Н. Кропачев<sup>а</sup>, Е. Р. Хабибуллина<sup>а</sup>, А. В. Зиятдинова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: anton.losev@itep.ru

Поступила в редакцию 20.05.2023 г.

После доработки 27.06.2023 г.

Принята к публикации 03.07.2023 г.

Сеточные электростатические линзы часто используются в системах транспортировки пучка низкой энергии для согласования с ускорителями. Современная вычислительная техника и программное обеспечение позволяют рассматривать сетку, как набор проволок с заданным диаметром и размером ячейки. В работе представлены результаты численного моделирования системы извлечения пучка лазерно-плазменного источника ионов и электростатической линзы — системы согласования с линейным ускорителем И-4, и их сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** электростатическая линза, лазерно-плазменный источник ионов

**DOI:** 10.56304/S2079562923030235

#### ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование — мощный метод изучения и оптимизации систем извлечения и транспортировки пучков заряженных частиц. Компьютерная программа Kobraz-INP [1] позволяет проводить такие расчеты. Она является трехмерной и может использовать неоднородную сетку, что дает возможность задавать сложную геометрию электродов и рассматривать линзу не как прозрачную для частиц плоскость с заданным потенциалом, а набор проволок. Для моделирования ускорения ионного пучка в линейном ускорителе И-4 применена программа Dynamion [2]. Она позволяет производить расчеты динамики пучка, содержащего различные зарядовые состояния.

Был проведен эксперимент по ускорению пучка лазерно-плазменного источника ионов [3], на входе и выходе ускорителя измерен полный ток. Результаты численных расчетов сравниваются с этими измерениями.

#### СХЕМА УСТАНОВКИ

На рис. 1 изображена схема установки линейный ускоритель И-4. Лазерно-плазменный источник основан на импульсно-периодическом CO<sub>2</sub>-лазере, подробное описание его дано в работе [4].

#### НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Из экспериментов по измерению характеристик плазмы с помощью электростатического анализа

тора были получены: распределение по зарядовым состояниям, парциальные токи (рис. 2), распределение по продольным скоростям.

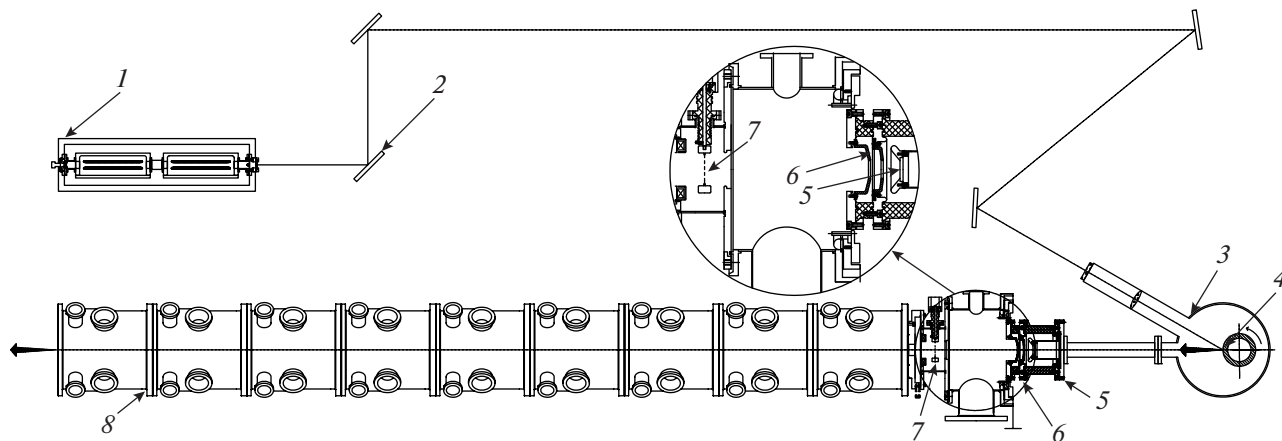
Для расчетов взят интервал по времени от 11 до 16 мкс содержащий наибольшее количество ионов C<sup>4+</sup>. В эксперименте синхронизация работы всей установки настраивалась на этот временной интервал.

Для расчетов в Kobraz-INP были сделаны следующие предположения о характеристиках плазмы: пространственный заряд плазмы полностью скомпенсирован, температура электронов плазмы перед экстракцией 1 эВ, поперечная температура ионов 0.1 эВ. Для задания поперечной температуры ионов и температуры электронов плазмы, образованной лазерным излучением с длиной волны 10.6 мкм, использованы соотношения из работы [5].

Параметры задания макрочастиц: макрочастицы распределены однородно в круге, который расположен перед отверстием системы экстракции, с постоянной плотностью тока. количество макрочастиц для каждого зарядового состояния пропорционально его плотности тока, изначальное количество — 40000 макрочастиц.

#### СИСТЕМА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПУЧКА И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЛИНЗА

Для извлечения ионного пучка применялась ускоряюще-замедляющая система. Чтобы ионы C<sup>4+</sup> набирали необходимую для инъекции в ускоритель И-4 энергию, плазменный электрод дол-



**Рис. 1.** Схема установки линейного ускорителя И-4. 1 – CO<sub>2</sub>-лазер, 2 – поворотные зеркала, 3 – вакуумная камера, 4 – мишень, 5, 6 – электроды системы извлечения, 7 – электростатическая сеточная линза, 8 – ускоряющая структура ПОКФ.

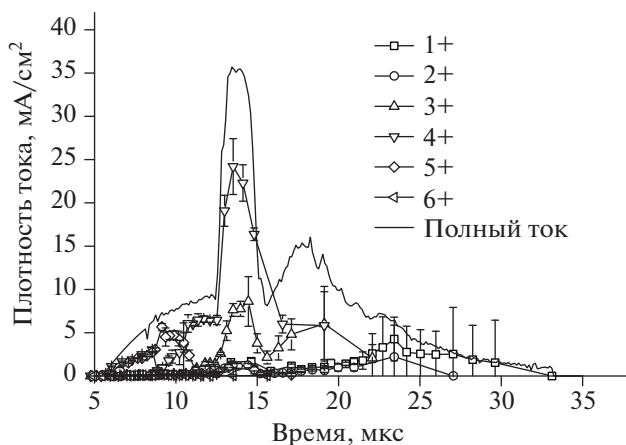
жен находиться под потенциалом +60 кВ. Отрицательный электрод имел потенциал –10 кВ. В плазменном электроде была установлена плоская диафрагма диаметром 20 мм для ограничения тока. Извлеченный пучок ионов углерода с требуемыми характеристиками должен быть доставлен к области захвата в ускоритель. Для этого используется электростатическая линза с одной сеткой, которая состоит из двух рядов проволоочек диаметром поперечного сечения 150 мкм, натянутых перпендикулярно друг другу с шагом 4 мм и прикрепленных к кольцу. Потенциал линзы –90 кВ. Питание линзы обеспечивал импульсный трансформатор. Длительность импульса напряжения составляла около 400 мкс, что больше длительности импульса ионного тока, поэтому для расчета можно считать питание линзы постоянным. Между системой извлечения и линзой имелось дрейфовое пространство, необходимое для установки ваку-

умного насоса. На рис. 3 изображена описываемая часть установки.

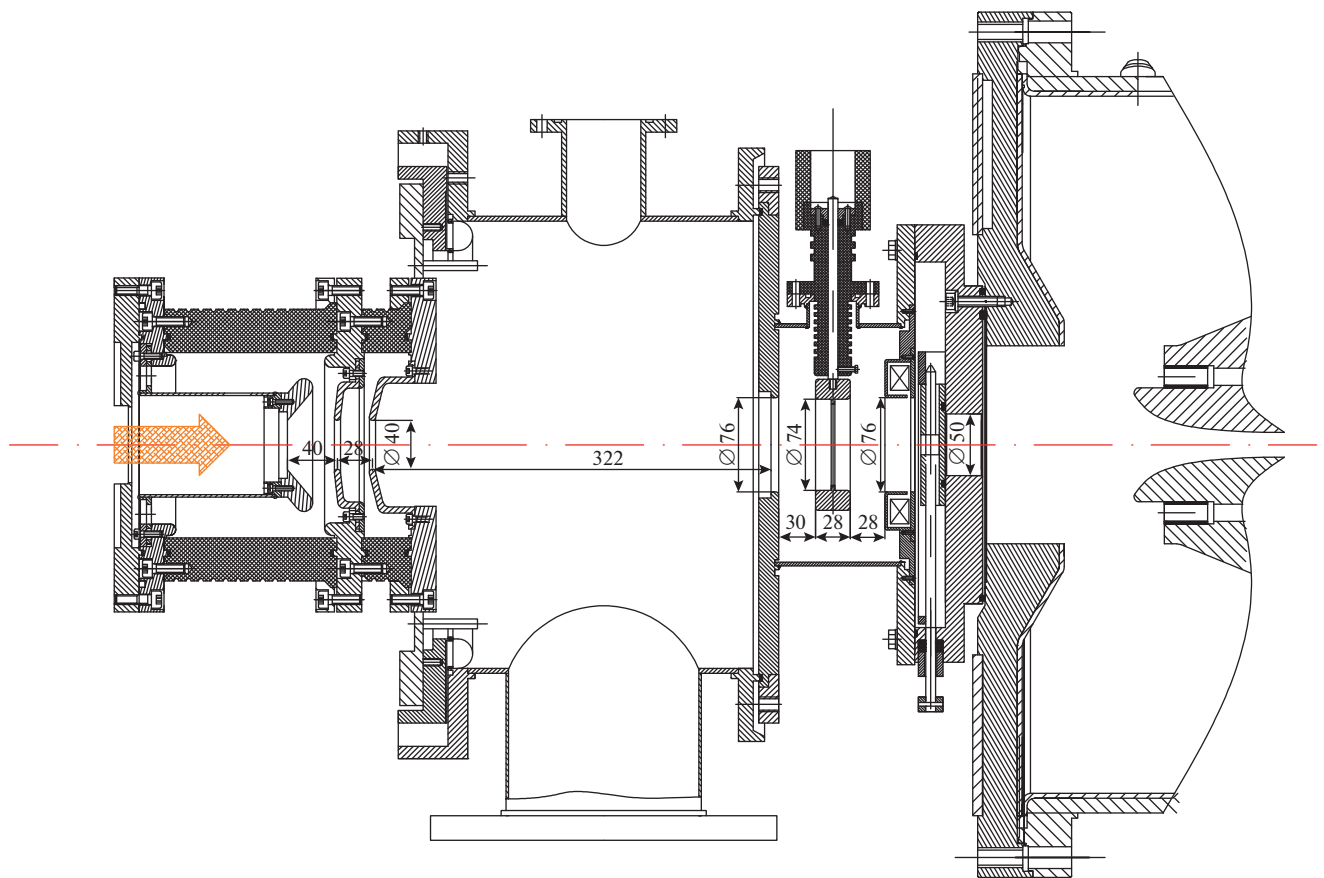
### МОДЕЛИРОВАНИЕ В KOBRA3-INP И DYNAMION

Kobra3-INP позволяет разделить расчет сложной системы на несколько задач. В данном случае отдельно рассматривались извлечение пучка и его фокусировка электростатической линзой.

На рис. 4 изображены траектории ионов углерода в системе экстракции. Полный ток пучка 24.6 мА при 4гms эмиттансе 310 мм мрад в обоих фазовых плоскостях. Далее пучок передается в линзу. Как видно из рис. 5 дрейфовое пространство, используемое для установки насоса, не позволяет доставить пучок без потерь. На рис. 6 представлен фазовый портрет пучка после прохождения линзы на входе в ускоритель. В целом пучок фокусируется линзой, но при прохождении сетки



**Рис. 2.** Парциальные токи ионов углерода.



**Рис. 3.** Система извлечения пучка и электростатическая линза. Стрелкой показано направление падающей плазмы. Справа показано начало ускоряющей структуры.

разделяется на отдельные микропучки, каждый из которых дефокусируется. Этим объясняются наблюдаемые искажения. Полный ток пучка на выходе электростатической линзы 14.4 мА при 4rms эмиттансе 760 мм мрад.

Ускорение пучка смоделировано с помощью кода Dynatіon с имеющейся моделью ускорителя И-4. Результаты расчетов в Kobrа3-INP были использованы в качестве начальных условий. Полный

ток пучка ускоренного до энергии 1.6 МэВ/н составил 5.7 мА, трансмиссия – 40%.

**СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В табл. 2 приведено сравнение параметров пучка, полученных в расчете и измеренных в эксперименте из работы [3]. Несовпадение полного тока можно объяснить тем, что берется не вся длитель-

**Таблица 1.** Распределение ионов углерода для расчета

Ион	C <sup>1+</sup>	C <sup>2+</sup>	C <sup>3+</sup>	C <sup>4+</sup>	C <sup>5+</sup>	C <sup>6+</sup>	Все
Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>	0.33	0.21	1.33	4.7	0.22	0.1	6.86

**Таблица 2.** Сравнение результатов расчета с измерениями

Параметр	Численное моделирование	Измерение, максимальное значение
Полный ток на входе в ускоритель, мА	14.4	25.8
ε <sub>4rms</sub> на входе в ускоритель, мм мрад	760	560, 520
Полный ток ускоренного пучка, мА	5.7	7.8

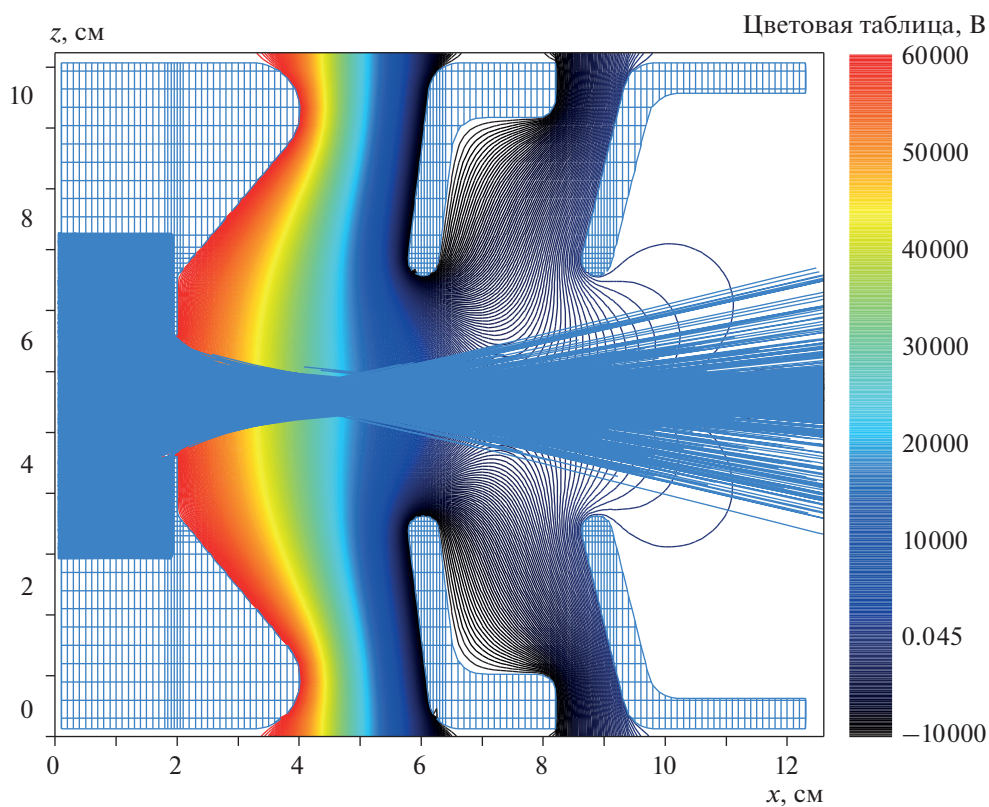


Рис. 4. Траектории ионов углерода в системе экстракции.

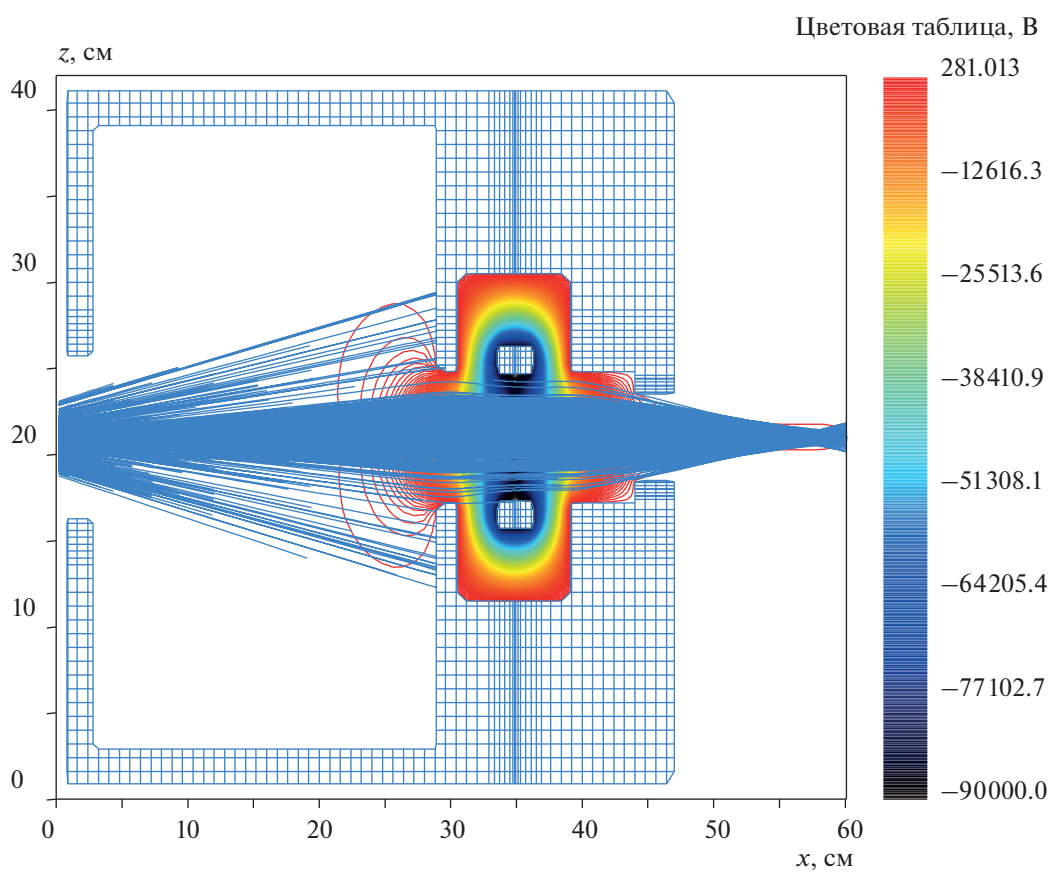


Рис. 5. Траектории ионов углерода в электростатической линзе.

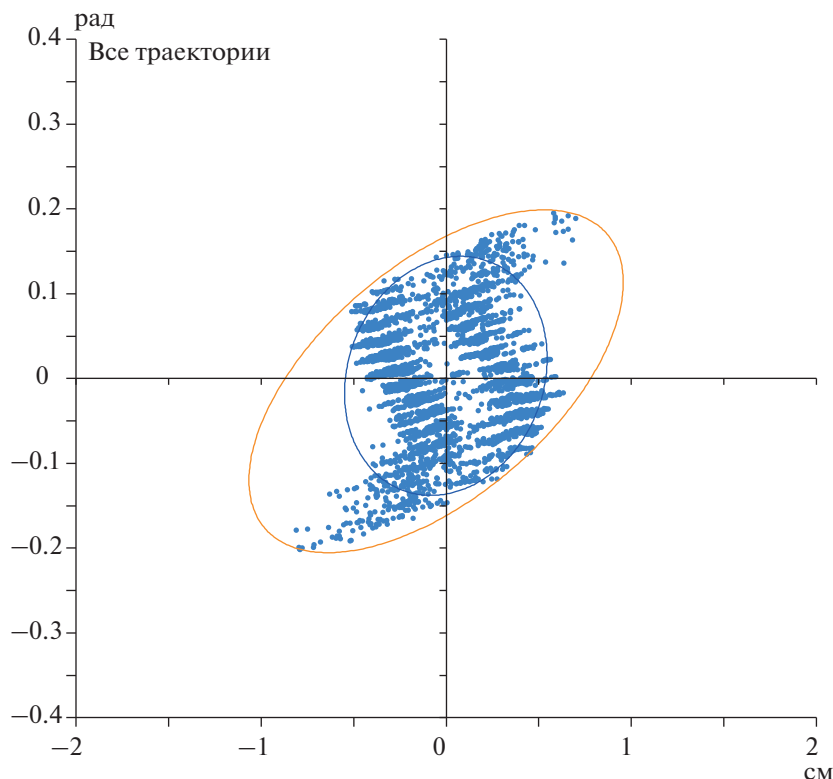


Рис. 6. Фазовый портрет пучка после прохождения линзы на входе в ускоритель.

ность пучка, а несовпадение эмиттанса — ограниченной чувствительностью сцинтиллятора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Kobra3-INP user manual. 2011.
2. Yaramyshev S. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2006. V. 558 (1). P. 90.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.018>
3. Losev A.A. *et al.* // Proc. 26th Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC'18). P. 498.  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-THP-SC47>
4. Satov Yu.A. *et al.* // Instrum. Exp. Tech. 106. V. 59 (3). P. 412.  
<https://doi.org/10.1134/s0020441216020251>
5. Roudskoy I.V. // Laser Part. Beams. 1996. V. 14 (3). P. 369.  
<https://doi.org/10.1017/S0263034600010090>

## Numerical Simulation of Beam-Extraction System and Grid Electrostatic Lens for I-4 Linear Accelerator

A. A. Losev<sup>1</sup>\*, G. N. Kropachev<sup>1</sup>, E. R. Khabibullina<sup>1</sup>, and A. V. Ziyatdinova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia

\*e-mail: anton.losev@itep.ru

Received June 20, 2023; revised June 27, 2023; accepted July 3, 2023

**Abstract**—Grid electrostatic lenses are often used in low-energy beam-transport systems to match accelerators. Modern computer technology and software allow us to consider a grid as a set of wires with a given diameter and cell size. The work presents the results of numerical simulation of a beam-extraction system of a laser plasma ion source and an electrostatic lens: matching systems with the I-4 linear accelerator and their comparison with experimental data.

**Keywords:** electrostatic lens, laser plasma ion source