

## ДИНАМИКА ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-2

*Д. Старостенко<sup>а,1</sup>, А. Акимов<sup>а</sup>, П. Бак<sup>а</sup>, Д. Болховитянов<sup>а</sup>,  
Я. Куленко<sup>а</sup>, П. Логачев<sup>а</sup>, Д. Никифоров<sup>а</sup>, А. Петренко<sup>а</sup>, О. Павлов<sup>а</sup>,  
А. Павленко<sup>а</sup>, А. Пачков<sup>а</sup>, А. Ахметов<sup>б</sup>, А. Черница<sup>б</sup>, О. Никитин<sup>б</sup>,  
А. Каргин<sup>б</sup>, П. Колесников<sup>б</sup>, С. Хренков<sup>б</sup>, Д. Петров<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики им. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

Рентгенографические комплексы на базе линейного индукционного ускорителя предназначены для изучения быстропротекающих гидродинамических процессов и используют сильный электронный пучок для получения точечного источника гамма-излучения при помощи конверсионной мишени. Источником электронов в таких установках служат инжекторы, способные генерировать импульсы длительностью от десятков наносекунд до нескольких микросекунд и током в несколько килоампер. Задача транспортировки и фокусировки такого пучка в диаметр порядка 1 мм является сложной из-за большого влияния эффекта пространственного заряда.

Применение термоэмиссионного катода, в отличие от автоэмиссионного катода, обеспечивает стабильную генерацию нескольких последовательных импульсов с временным интервалом в несколько микросекунд, и из-за этого предъявляются высокие требования к вакуумной системе инжектора: не хуже  $10^{-7}$  Торр [1].

X-ray facilities based on a linear induction accelerator are designed to study high density objects. It requires the high-current electron beam to obtain a small spot and bright X-ray source using a conversion target. The electrons source in such facilities is injectors capable of generating pulses with a duration from tens of nanoseconds to several microseconds and a current of several kA. The transportation and focusing of high-current beams into diameter about 1 mm is difficult due to the space charge phenomena. The use of a thermionic cathode, as compared to auto-emission cathode, provides stable generation of several pulses with a time interval of several microseconds, but makes high requirements on the injector vacuum system: not less than  $10^{-7}$  Torr [1].

PACS: 41.50.+h; 29.20.Ej

---

<sup>1</sup>E-mail: d.a.starostenko@inp.nsk.su

## ДИСПЕНСЕРНЫЙ КАТОД

Катодный узел является неотъемлемой частью любой системы формирования пучка. Для изучения однородности эмиссии с поверхности катода были произведены тепловые расчеты системы нагрева катода с целью оптимизации катодного узла. В частности, изучалась однородность распределения температуры вдоль поверхности зерна катода. Это принципиально важно с точки зрения формирования пучка.

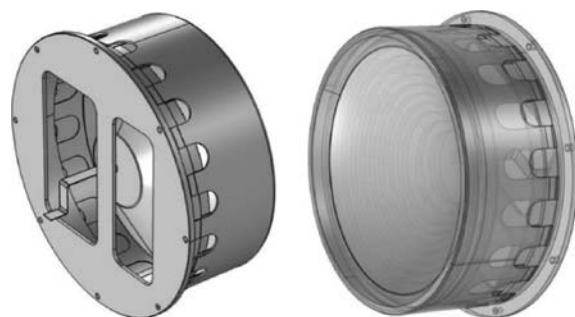


Рис. 1. Внешний вид катодного узла

Численное 3D-моделирование выполнено с помощью программной платформы COMSOL Multiphysics. При расчетах применялся модуль Surface-to-surface radiation, который позволяет учитывать теплообмен излучением между твердыми телами в прозрачной среде. В качестве исходной геометрии использовалась 3D-модель катодного узла. Все расчеты произведены для стационарного теплового режима. Внешний вид модифицированного катодного узла в сборе представлен на рис. 1.

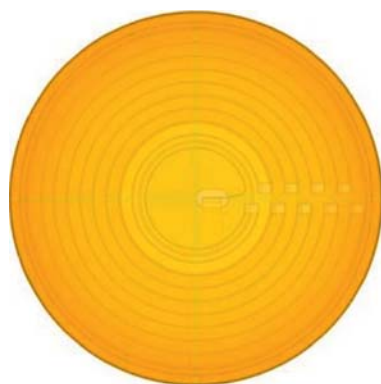


Рис. 2. Модель катода для тепловых расчетов в COMSOL для получения распределения температуры на поверхности катода

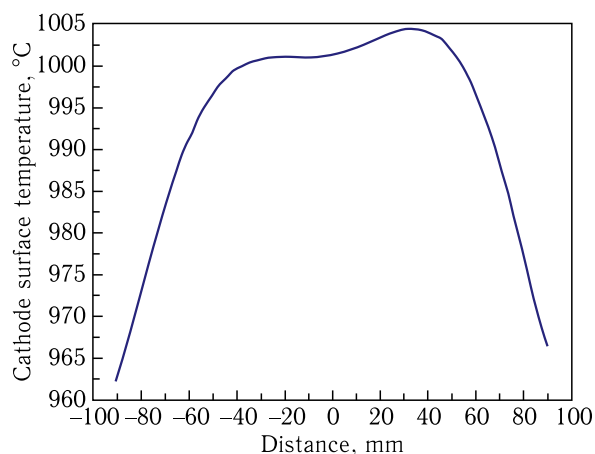


Рис. 3. Распределение температуры вдоль горизонтального сечения поверхности катода

При мощности 2500 Вт температура косвенного подогревателя достигает 1500 °С, температура поверхности катода около 1000 °С. Несимметричная форма подогревателя (рис. 2) приводит к увеличению на 4 градуса температуры в локальной зоне, что является допустимой величиной (рис. 3).

## РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ПУЧКА

В настоящее время разработано несколько различных кодов для моделирования сильноточных электронных пучков в ускорителях. Для корректного учета пространственного заряда необходимо проводить моделирование с участием большого числа макрочастиц, при этом время счета может занимать часы и даже дни, в зависимости от решаемой задачи и размеров системы даже с привлечением высокопроизводительной вычислительной техники. Простой и удобной альтернативой для моделирующих программ с макрочастицами может быть код на основе уравнения огибающей для аксиально-симметричного пучка с равномерным распределением. Один из таких кодов был разработан в ИЯФ СО РАН.

Для расчетов динамики пучка в ЛИУ-2 использовались коды K-V envelope code и REDPIC [2], разработанные в ИЯФ СО РАН. Уравнение огибающей для аксиально-симметричного пучка имеет вид

$$r'' + k_s r - \frac{P}{r} - \frac{\epsilon^2}{r^3} = 0.$$

Здесь рассматривается круглый пучок с радиусом  $r$  и равномерным распределением плотности объемного заряда, причем  $P = (2I)/(I_a \beta^3 \gamma^3)$  — обобщенный первеанс пучка,  $I_a = 17$  кА;  $\epsilon$  — эмиттанс пучка;  $k_s = (eB_z/2mc\beta\gamma)^2$  — жесткость соленоидальных линз;  $\beta$  — безразмерная скорость;  $\gamma$  — лоренц-фактор.

На рис. 4 представлено сравнение моделирований с помощью кодов K-V envelope code (черная штриховая линия) и REDPIC (голубое заполнение). Моделирование в программе REDPIC осуществлялось с равномерным поперечным распределением частиц в пучке и длительностью импульса  $\sim 200$  нс. Время счета такой задачи занимает около  $\sim 4$  ч. При моделировании с помощью кода K-V envelope code (штриховая линия) интегрирование уравнения огибающей с шагом в  $\sim 1$  мм по  $z$  занимает несколько секунд. Результаты моделирования с помощью вышеуказанных кодов показывают хорошее соответствие между собой.

Магнитная система ЛИУ-2 состоит из трех импульсных бронированных соленоидов длиной 217 мм с максимальным полем до 2 кГс и короткого бронированного соленоида — линзы финального фокуса длиной 60 мм с максимальным полем 4,5 кГс. Основная задача магнитной системы заключается в обеспечении транспортировки пучка от катода до мишенного узла без токовых потерь и качественной фокусировки.

Сферическая абберация финальной фокусной линзы приводит к тому, что периферийные частицы преломляются сильнее, и это не позволяет сфокусировать пучок большого диаметра в требуемый размер 1 мм (рис. 5).

Оценим размер пучка на входе в линзу финального фокуса, при котором размер абберационного пятна будет равен менее 1 мм. Рассмотрим линзу финального фокуса со следующими параметрами, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры линзы финального фокуса

Параметр	Значение
Длина, мм	60
Радиус апертуры, мм	60
Магнитное поле, кГс	До 4

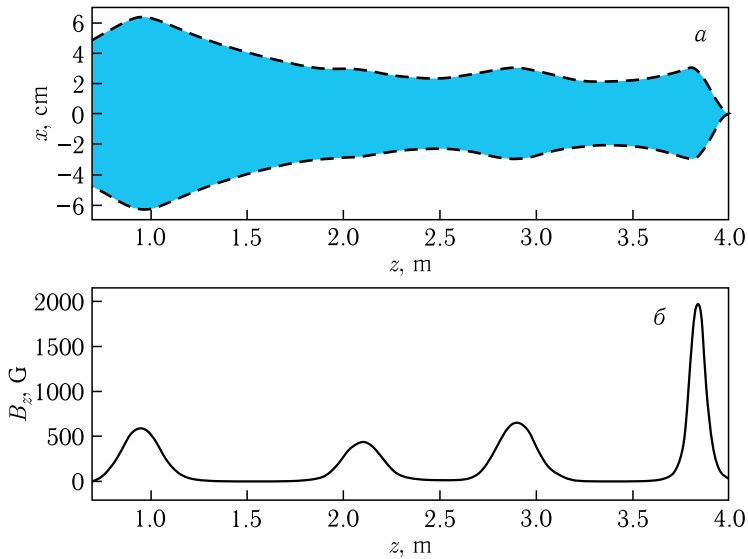


Рис. 4 (цветной в электронной версии). а) Сравнение расчетов динамики пучка при помощи К-V envelope code (черная штриховая линия) и REDPIC (голубое заполнение). б) Продольное распределение магнитного поля вдоль транспортного канала

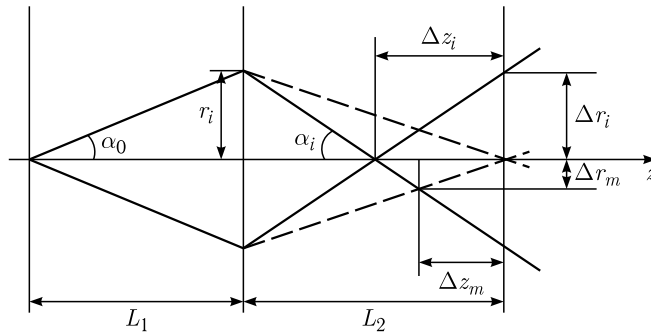


Рис. 5. Схематическое изображение траекторий частиц при прохождении тонкой линзы со сферической аберрацией

Расчет без учета пространственного заряда в UltraSAM траекторий для параллельного округлого пучка после прохождения линзы выполнен для разных радиусов пучка. Из рис. 6 видно, как за счет сферической аберрации ведут себя перефокусиру-

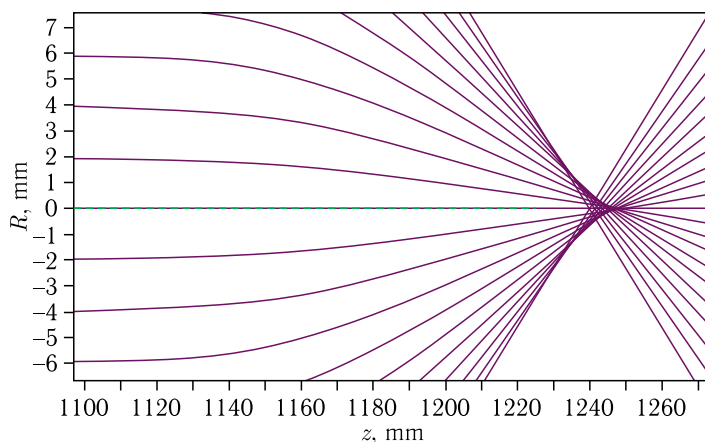


Рис. 6. Результат моделирования траекторий пучка после прохождения линзы финального фокуса

ванные траектории. В табл. 2 представлены значения  $\Delta r_{\min}$  в зависимости от размера пучка  $r_i$  на входе в линзу, полученные аналитическим методом и при помощи программы UltraSAM.

Таблица 2. Сравнительные результаты

$r_i$ , мм	UltraSAM $\Delta r_{\min}$ , мм	Аналитическая оценка $\Delta r_{\min}$ , мм
25	0,88	0,71
20	0,41	0,35
15	0,19	0,16
10	0,05	0,04

Расхождение между результатами моделирования и аналитической оценкой находится в пределах 20%, что может быть обусловлено ошибками численных расчетов, связанными с малыми размерами пучка в кроссовере. Тем не менее можно сделать вывод о том, что на входе в линзу финального фокуса величина радиуса пучка  $r_i$  не должна превышать 20 мм.

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Для снижения влияния сферической абберации линзы финального фокуса на размер фокусного пятна размер пучка на входе в финальную линзу должен быть оптимизирован.

Расчеты при помощи K-V envelope code показывают, что установка дополнительной линзы перед финальной линзой позволяет изменить радиус пучка на входе перед финальной линзой в широком диапазоне, а значит, удовлетворить требованиям для размера фокусного пятна, описанным выше (рис. 7).

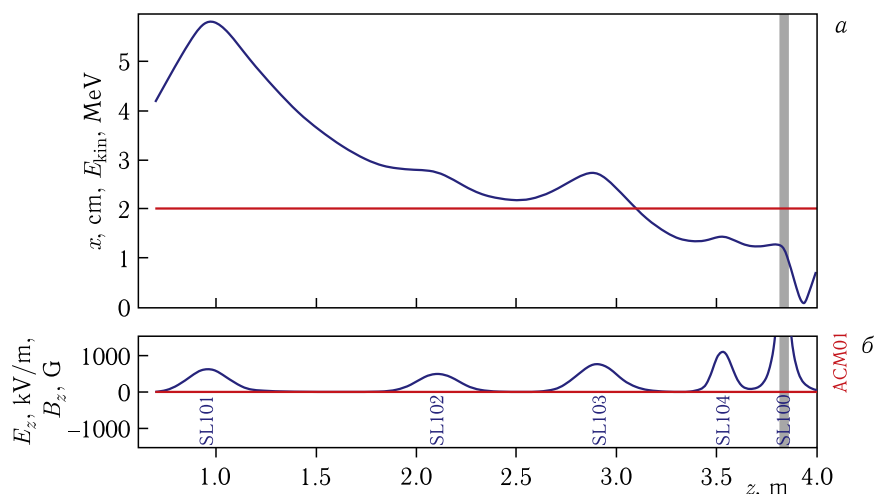


Рис. 7. а) Огибающая пучка; б) продольное распределение магнитного поля

## ТРАНСПОРТНЫЙ КАНАЛ

Разработана новая версия транспортного канала пучка, включающая новый трансформатор тока, датчик переходного излучения для измерения поперечного профиля пучка, дополнительную линзу между третьей и финальной линзами (рис. 8).

Это позволит визуально наблюдать поперечный профиль и размер пучка, измерить основные параметры пучка, снизить влияние сферической aberrации, упростить настройку магнитной системы для качественной фокусировки пучка на конверсионную мишень.

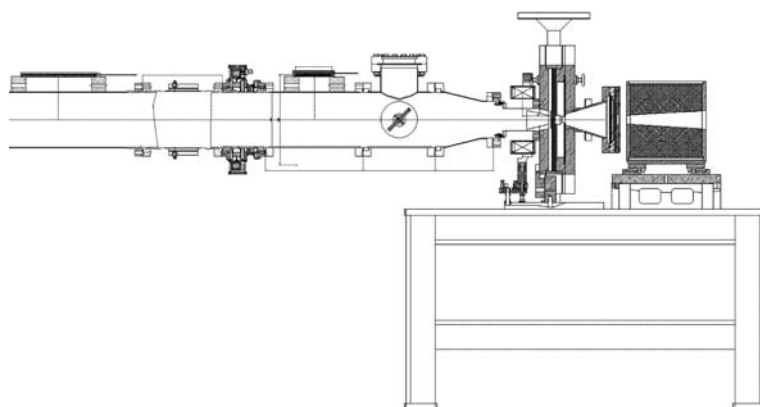


Рис. 8. Новая версия транспортного канала пучка

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая версия катодного узла произведена и успешно установлена на ЛИУ-2.

Разработанный в ИЯФ СО РАН K-V envelope code позволяет за несколько секунд выполнить расчеты огибающей пучка с учетом пространственного заряда и учесть влияние сферической аберрации линзы финального фокуса.

Предложена новая конфигурация транспортного канала с новыми элементами диагностики с апертурой 152 мм для измерения поперечного профиля, расчета коррекции орбиты и других параметров пучка.

**Благодарности.** Данная работа была выполнена при поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Takayama K., Briggs R. J.* Induction Accelerators. 2010. P. 119–120.
2. *Novokhatski A. V.* REDPIC. Computer Simulation of Radiation Field Dynamics in Accelerating Structures. Preprint INP 82-157. 1982.

Получено 26 января 2022 г.