

## ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-2

*Г. И. Кузнецов<sup>1</sup>, М. А. Батазова*

Институт ядерной физики Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Представлена электронно-оптическая система (ЭОС) индукционного ускорителя для получения электронного пучка с энергией 2 МэВ и током 2 кА в импульсе длительностью  $2 \cdot 10^{-7}$  с с геометрическим эмиттансом на выходе, не превышающим тепловой. ЭОС состоит из двух частей. Первая — диодная пушка с первеансом  $2 \cdot 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup> и напряжением катод–анод 1 МэВ. Вторая — ускорительная трубка с равномерным распределением такого же ускорительного напряжения. Пучок транспортируется на расстояние около 4 м от катода и фокусируется в пятно диаметром около 1 мм.

При испытаниях ЛИУ на проектные параметры получено точное соответствие расчетам.

Optics of an induction accelerator LIA-2 for electron beam generation is presented. Its main parameters are: energy is 2 MeV, current is 2 kA in a pulse of  $2 \cdot 10^{-7}$  s duration, and beam has a geometrical emittance at the exit less than a thermal one. Optics consists of two parts: a 1 MeV diode gun with perveance  $2 \cdot 10^{-6}$  A/V<sup>3/2</sup> and an accelerating tube with regular voltage distribution of another 1 MeV.

The electron beam is transported over 4 meters from the cathode and focused on the target into a spot of about 1 mm in diameter.

The results of LIA-2 commissioning showed good correspondence with simulations.

PACS: 29.27-a

### ВВЕДЕНИЕ

ЭОС ЛИУ-2 создавалась с целью получения электронного пучка с небольшим эмиттансом для его фокусировки на мишени в пятно минимального диаметра [1]. Для этого пригодна лишь система с нулевым магнитным полем в зоне формирования пучка и надлежащей конфигурацией электродов при старте и ускорении.

В существующих системах формирования пучка в ЛИУ [2] грубо компенсируют магнитное поле на поверхности катода от магнитной линзы в аноде. Иногда в анодное отверстие ставится сетка [3], не согласованная по электрическим полям с обеих сторон, и пучок получает большие углы при прохождении сетки. В обоих случаях траектории

---

<sup>1</sup>E-mail: G.I.Kuznetsov@inp.nsk.su

электронов получают большие углы, т. е. большой геометрический эмиттанс, и становятся непригодными для фокусировки в пятно малого размера, даже при значительном увеличении энергии пучка при последующем ускорении. В нашем случае критическим магнитным полем на катоде является величина 0,1–0,2 Гс, которая дает вклад в размер пятна на мишени, равный вкладу температуры катода. Отсюда следует, что необходима экранировка даже от земного магнитного поля.

### ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ

Для расчетов электронно-оптической системы ускорителя ЛИУ-2 использовался пакет интерактивных программ UltraSAM [4]. Он является развитием пакета программ SAM [5], который был разработан в ИЯФ в 1985–1987 гг. для решения двумерных задач электростатики, линейной магнитостатики, анализа траекторий заряженных частиц в статических полях без учета объемного заряда и с учетом объемного заряда при проектировании электронных пушек и коллекторов. Программа разрабатывалась специально для работы на персональном компьютере под операционными системами Windows NT/2000/XP.

Пользователь для описания изучаемой оптики может использовать широкий набор элементов: металлические электроды с постоянным или «плавающим» потенциалом, диэлектрики с заданной диэлектрической проницаемостью, соленоиды или постоянные магниты, ферромагнетики. Электростатические и магнитостатические задачи решаются методом граничных интегральных уравнений, которые записываются для конечного числа точек разбиения (точек коллокаций) электродов, границ диэлектриков и ферромагнетиков, которые задает сам пользователь при введении рассчитываемой геометрии. Распределение плотности поверхностного заряда высчитывается методом сплайна через значения в этих точках. Для повышения точности расчета в программе есть алгоритм выделения особенностей плотности поверхностного заряда на острых кромках электродов, диэлектриков и магнетиков, которые плохо описываются методом сплайн-интерполяции.

Для описания динамики пучка используется гидродинамическая модель трубок тока. Распределение объемного заряда пучка описывается с помощью сетки, покрывающей область распространения пучка. В первых версиях SAM была прямоугольная сетка, что вызывало некоторые проблемы при расчетах пучков с большой компрессией. В UltraSAM-е используется криволинейная сетка, которая позволяет пользователю подстраивать ее под геометрию пучка и, даже при сильной компрессии, иметь в сечении пучка большое количество узлов для описания объемного заряда.

Для описания эмиссии с катода используется модель сферического диода. Можно задать несколько эмитирующих поверхностей, ограничить плотность тока эмиссии с катода или производить расчет в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Для расчета электронных пушек решается самосогласованная задача, учитывающая поля системы и поля, создаваемые самим пучком. Пользователь имеет возможность наблюдать за процессом итераций в режиме «on-line».

Для расчета ЭОС ЛИУ использовалась сетка из 5500 ячеек, около 23000 узлов и 200 трубок тока. Расчет одной итерации под системой Windows XP с частотой 2,6 ГГц и 2 ГБ ОЗУ занимает 7–8 мин. Количество необходимых итераций около 60. При неболь-

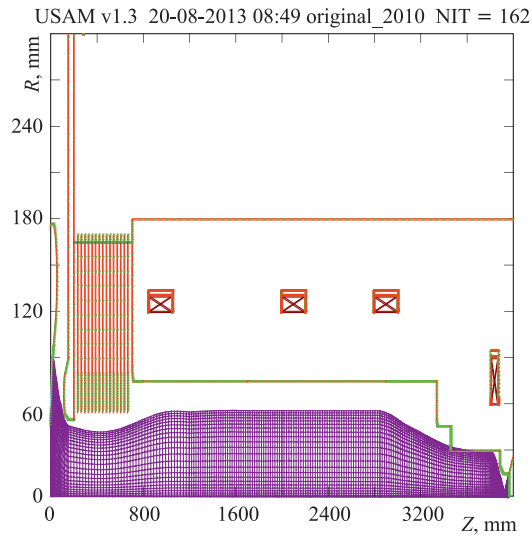


Рис. 1. Геометрия и сетка для расчета пучка

ших изменениях в геометрии или настройке тока в катушках счет можно продолжить, используя предыдущий рассчитанный вариант, что существенно сокращает общее время ввода и счета.

Расчет ЭОС осуществляется для «идеального» пучка, без учета теплового разброса электронов с целью получения минимального геометрического эмиттанса. Если предусматривается большая компрессия пучка, в расчет добавляется «тепло».

На рис. 1 приведена геометрия ЛИУ-2 и криволинейная сетка для расчета ЭОС.

## ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЛИУ-2

Результаты расчета электронно-оптической системы представлены на рис. 2.

ЭОС ЛИУ-2 состоит из двух частей. Первая представляет собой диодную электронную пушку с микропервансом около 2. Сферический катод имеет диаметр 180 мм, диаметр анодного отверстия равен 90 мм. К пушке прикладывается напряжение до 1 МВ. В верхнем правом углу на рис. 2 представлено распределение плотности тока вдоль поверхности катода. Плотность тока пучка с края катода равна  $11,15 \text{ A/cm}^2$ , что в 2,17 раза выше, чем из центра.

Вторая часть — это ускорительная трубка с рабочей длиной 480 мм и с равномерным распределением потенциала. К ней также приложено напряжение 1 МВ. Обе части соединены каналом длиной 85 мм. К ускоряющей трубке присоединен канал транспортировки, представляющий собой трубу диаметром 150 мм с тремя импульсными сопровождающими магнитными линзами с внутренним диаметром 220 мм и финишной линзой для фокусировки пучка на мишень. Линзы установлены на небольшом расстоянии друг от друга, чтобы исключить влияние их сферической аберрации на эмиттанс. Диаметр финишной линзы подобран таким образом, чтобы ее сферическая аберрация не выходила за размеры фокусного пятна.

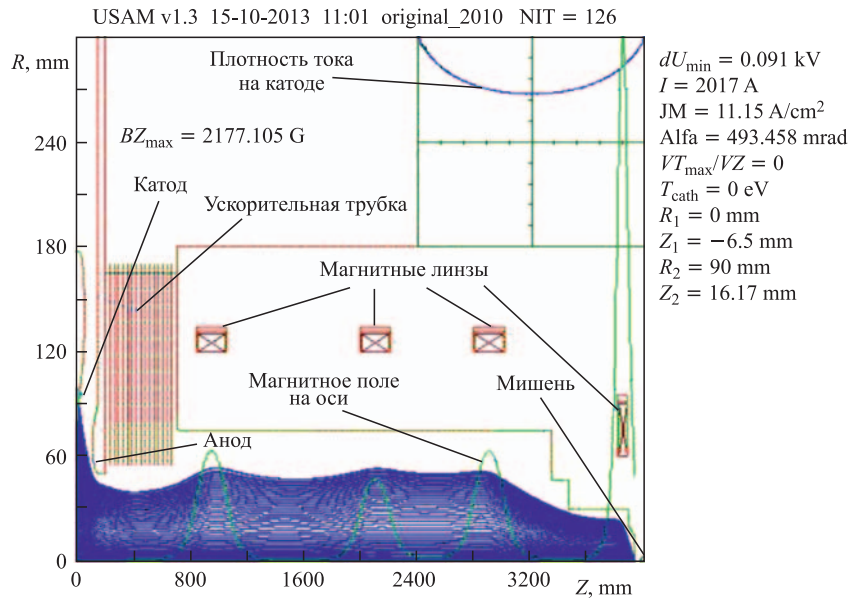


Рис. 2. ЭОС ЛИУ-2

Вид траекторий и размер фокусного пятна в ЭОС без учета теплового разброса на катоде тепла показан на рис. 3. При добавлении в расчет «тепла» величиной 1 эВ на катоде плотность тока на мишени становится ближе к гауссовому распределению (рис. 4) и плотность тока в центре достигает 1 МА/см<sup>2</sup>.

Тепло на катоде включает в себя, соответственно, температуру катода, пятнистость эмиссии с поверхности, шероховатость последней и задается косинусным распределением

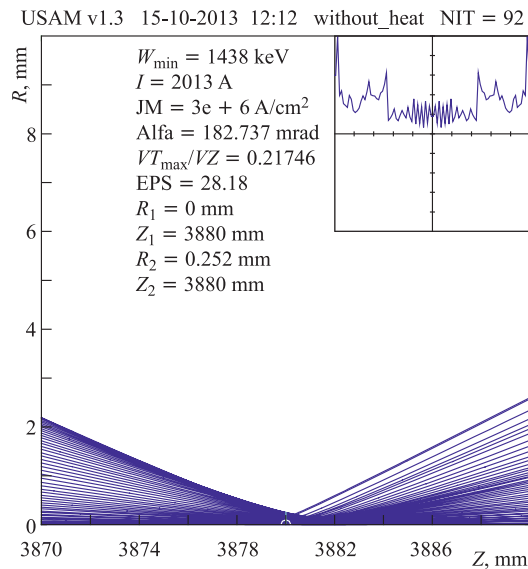


Рис. 3. «Холодный» пучок на мишени

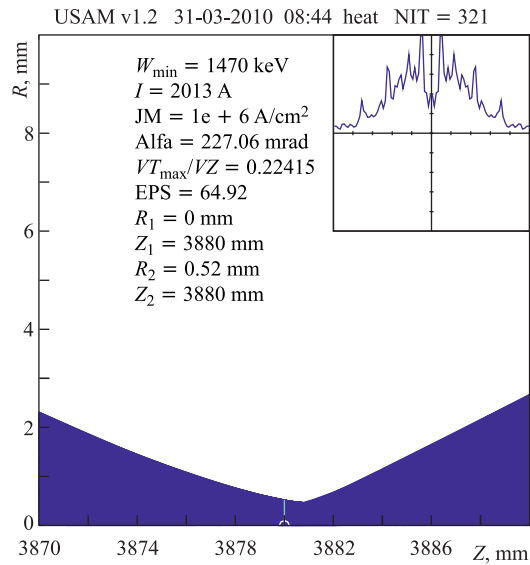


Рис. 4. «Теплый» пучок на мишени

траекторий при старте. Диаметр «холодного» пучка на мишени равен 0,5 мм, «тепло» пучка увеличивает его вдвое, но на половине амплитуды плотности тока имеем диаметр «холодного» пучка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементы ЭОС ЛИУ-2 были изготовлены с высокой точностью. Результаты экспериментов показали соответствие расчетам с точностью 2–3% по току и размеру пятна на мишени.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность М. А. Тиуну и А. В. Иванову за ценные консультации и плодотворное обсуждение расчетов ЭОС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Logachev P. et al.* Performance of 2 MeV, 2 kA, 200 ns Linear Induction Accelerator with Ultra Low Beam Emittance for X-ray Flash Radiography // Proc. of the 2nd Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2011). 2011. S.1. P. 1906–1908.
2. *Burns M. J. et al.* Status of DARTH Phase 2 Long-Pulse Accelerator // Proc. of the Part. Accel. Conf. Chicago, USA. 0-7803-7191-7/01/S10.00. IEEE. 2001. P. 325–329.
3. *Вахрушин Ю. П. и др.* Электронная пушка. Авт. свид. № 256903 // Бюл. изобретений. 1969. № 35. С. 51.
4. *Ivanov A., Tiunov M.* ULTRASAM — 2D Code for Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision // Proc. of the 8th Eur. Part. Accel. Conf. (EPAC 2002), Paris, June 3–7, 2002. P. 1634–1636.
5. *Иванов А. В., Тиунов М. А.* Применение метода граничных интегральных уравнений при моделировании формирования и динамики пучка в установках электронного охлаждения // Вестн. НГУ. Сер. «Физика». 2008. Т. 3, вып. 1. С. 56–61.