

## ТРАНСПОРТИРОВКА СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ЛИУ-5

*Д. А. Никифоров<sup>а,1</sup>, М. Ф. Блинов<sup>а</sup>, В. В. Федоров<sup>а</sup>, А. В. Петренко<sup>а</sup>,  
П. В. Логачев<sup>а</sup>, П. А. Бак<sup>а</sup>, К. И. Живанков<sup>а</sup>, А. В. Иванов<sup>а</sup>,  
А. А. Старостенко<sup>а</sup>, О. А. Павлов<sup>а</sup>, Г. И. Кузнецов<sup>а</sup>, М. А. Батазова<sup>а</sup>,  
Д. А. Старостенко<sup>а</sup>, Д. В. Петров<sup>б</sup>, О. А. Никитин<sup>б</sup>, А. Р. Ахметов<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

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

Рассматривается вопрос транспортировки сильноточного электронного пучка в ускорителе ЛИУ-5. Приводятся результаты численного моделирования транспортировки пучка в ускорительном тракте длиной 15 м с помощью различных кодов. В частности, был применен код ASTRA, использующий макрочастицы (PIC-код). Кроме того, были применены два кода, разработанные в ИЯФ СО РАН: код на основе решения системы уравнений Капчинского–Владимирского (K-V envelope code) и код UltraSAM, использующий метод граничных интегральных уравнений. Результаты экспериментов показали хорошее соответствие с результатами моделирования. С помощью K-V envelope code с генетическим алгоритмом удалось восстановить огибающую электронного пучка по измеренным данным с люминофора.

This article considers the transportation of a high-current electron beam in the LIA-5 accelerator. It presents the results of numerical simulation of beam transport in the accelerator path 15 m in length using various codes. In particular, the ASTRA code, using macroparticles (PIC code), is also used here. In addition, two codes developed at the BINP were used: a code based on the solution of the Kapchinsky–Vladimirsky system of equations (K-V envelope code) and UltraSAM code using the method of boundary integral equations. The experimental results showed good agreement with the simulation results. Using the K-V envelope code with a genetic algorithm, it was possible to restore the envelope of the electron beam from the measured data from the luminophore.

PACS: 41.75.-i; 41.75.Fr; 41.85.Ar

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных способов получения точечных источников рентгеновского излучения для целей импульсной рентгенографии является сильноточный электронный пучок в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ). Пучок с током

---

<sup>1</sup>E-mail: nikdanila@bk.ru

в несколько килоампер, попадая на мишень-конвертор, формирует пучок рентгеновских фотонов. Для получения высокого пространственного разрешения необходимо минимальное поперечное сечение пучка (до 1–2 мм) на конверсионной мишени. Еще одной важной характеристикой для импульсной рентгенографии является объем получаемых данных при проведении эксперимента. С этой точки зрения необходимо обеспечить получение максимального количества информации за один эксперимент, для чего используется многоракурсный и многоимпульсный режим рентгенографической съемки, требующий разводки пучка по нескольким направлениям. Из перечисленных выше требований ясно, что важнейшей задачей для работы подобных рентгенографических комплексов является точный расчет транспортировки и динамики пучка в ЛИУ. Подобные расчеты должны помогать оператору осуществлять тонкую настройку ускорителя.

Существуют различные коды для моделирования сильноточных электронных и ионных пучков в ускорителях. Для корректного учета пространственного заряда в динамике пучка 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, а также может требовать огромных вычислительных ресурсов. Простой и удобной альтернативой для моделирующих программ с макрос частицами может быть код на основе уравнения огибающей для эллиптического пучка с распределением Капчинского–Владимирского. Несомненным преимуществом данного подхода является быстрота счета при достаточно хорошем соответствии с РС-кодами и экспериментом. В данной работе рассматривается транспортировка пучка с энергией 5 МэВ и током до 2 кА в ускорителе ЛИУ-5, разработанном в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН для целей импульсной рентгенографии. Приведены результаты моделирования динамики пучка различными кодами, а также их сравнение с экспериментом.

## 1. СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ ЛИУ-5

На рис. 1 представлена схема ускорительного комплекса ЛИУ-5, состоящая из трех основных частей: инжектора, ускоряющих модулей, системы разводки пучка для разных ракурсов.

Инжектор содержит 92 индуктора и генерирует пучок электронов с током 2 кА и энергией 2 МэВ. Для производства пучка используется металлопористый оксидный катод диаметром 180 мм. Основные параметры инжектора ЛИУ-5 приведены в таблице.

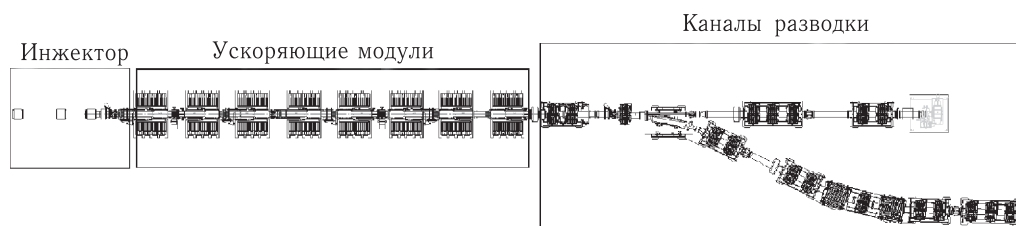


Рис. 1. Схема ускорителя ЛИУ-5

### Основные параметры инжектора ЛИУ-5

Параметр	Значение
Максимальная энергия, МэВ	2
Максимальный ток, кА	2
Мощность накала катода, кВт	3
Длительность импульса, нс	200
Максимальная частота повторения, Гц	0,1

Восемь коротких ускоряющих модулей (КУМ) располагаются после инжектора и служат для дальнейшего ускорения пучка до энергии 5 МэВ. Максимальное ускоряющее напряжение для каждого КУМ составляет 400 кВ. Фокусировка пучка осуществляется 12 импульсными соленоидами с максимальной амплитудой поля 2 кГс.

После ускорения до энергии 5 МэВ пучок попадает в один из двух каналов разводки: прямой или боковой. Боковой канал расположен под углом  $24^\circ$  по отношению к прямому, инжекция пучка в боковой канал осуществляется с помощью быстрого кикера и широкоапертурного септум-магнита.

## 2. УРАВНЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ДЛЯ ПУЧКА С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КАПЧИНСКОГО–ВЛАДИМИРСКОГО

В ускорительном комплексе ЛИУ-5 используются соленоидальные и квадрупольные линзы, при этом соленоидальные линзы расположены вместе с ускоряющими модулями, а квадрупольные линзы — только в каналах разводки (см. рис. 1). Рассмотрим два случая: уравнение огибающей для аксиально-симметричного пучка в канале с соленоидальными линзами и уравнения огибающей для эллиптического пучка с фокусировкой квадрупольными линзами.

**2.1. Уравнение огибающей для аксиально-симметричного пучка в канале с соленоидальными линзами.** Движение аксиально-симметричного пучка в транспортном канале при наличии соленоидов может быть описано следующим уравнением [1]:

$$r'' + \frac{1}{\beta^2 \gamma} \gamma' r' + \frac{1}{2\beta^2 \gamma} \gamma'' r + k_s r - \frac{P}{r} - \frac{\epsilon^2}{r^3} = 0, \quad (1)$$

где  $\beta$  — безразмерная скорость;  $\gamma$  — лоренц-фактор,  $\gamma' = d\gamma/dz$ ;  $\gamma'' = d^2\gamma/dz^2$ ;  $P = (2I)/(I_a \beta^3 \gamma^3)$  — обобщенный первеанс пучка,  $I$  — ток пучка,  $I_a = mc^3/e \approx 17$  кА;  $\epsilon$  — эмиттанс пучка;

$$k_s = \left( \frac{eB_z}{2m_e c \beta \gamma} \right)^2 = \left( \frac{eB_z}{2\beta \gamma \cdot 0,511 \cdot 10^6 e \text{ В/с}} \right)^2 = \left( \frac{cB_z[\text{Тл}]}{2\beta \gamma \cdot 0,511 \cdot 10^6 \text{ В}} \right)^2$$

— жесткость соленоидальных линз.

В уравнении (1) рассматривается круглый пучок с радиусом  $r$  и равномерным распределением плотности объемного заряда. В данном случае частицы запускаются с катода, экранированного от магнитного поля (фактически это условие означает отсутствие углового момента  $P_\theta = 0$ ).

**2.2. Уравнения огибающей для эллиптического пучка с фокусировкой квадрупольными линзами.** Движение пучка в транспортном канале при наличии квадрупольных линз может быть описано следующей системой уравнений [1]:

$$\begin{cases} a'' + \frac{1}{\beta^2\gamma}\gamma'a' + \frac{1}{2\beta^2\gamma}\gamma''a + k_q a - \frac{2P}{(a+b)} - \frac{\epsilon_x^2}{a^3} = 0, \\ b'' + \frac{1}{\beta^2\gamma}\gamma'b' + \frac{1}{2\beta^2\gamma}\gamma''b - k_q b - \frac{2P}{(a+b)} - \frac{\epsilon_y^2}{b^3} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь рассматривается эллиптический пучок с большими полуосями  $a$ ,  $b$  и равномерным распределением плотности объемного заряда, где  $\beta$  — безразмерная скорость;  $\gamma$  — лоренц-фактор;  $\gamma' = d\gamma/dz$ ;  $\gamma'' = d^2\gamma/dz^2$ ;  $P = (2I)/(I_a\beta^3\gamma^3)$  — обобщенный первеанс пучка;  $I$  — ток пучка,  $I_a = (mc^3)/e \approx 17$  кА;  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  — горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка соответственно; оси  $x$  и  $y$  декартовой системы координат направлены по большим полуосям эллипса пучка;

$$k_q = \left( \frac{eG}{m_e c \beta \gamma} \right) = \left( \frac{eG}{\beta \gamma \cdot 0,511 \cdot 10^6 e \text{ В/с}} \right) = \left( \frac{cG[\text{Тл/м}]}{\beta \gamma \cdot 0,511 \cdot 10^6 \text{ В}} \right)$$

— жесткость квадрупольных линз, причем  $G = \partial B_x/\partial y = \partial B_y/\partial x$  — градиент квадрупольной линзы.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В ЛИУ-5

Моделирование всего ускорителя делится на несколько этапов. Первый этап — расчет диода с помощью программы UltraSAM [2], которая была разработана в ИЯФ СО РАН специально для расчета электронных пушек и хорошо зарекомендовала себя с точки зрения соответствия моделированию эксперимента. Пример расчета диода ЛИУ-5 показан на рис. 2.

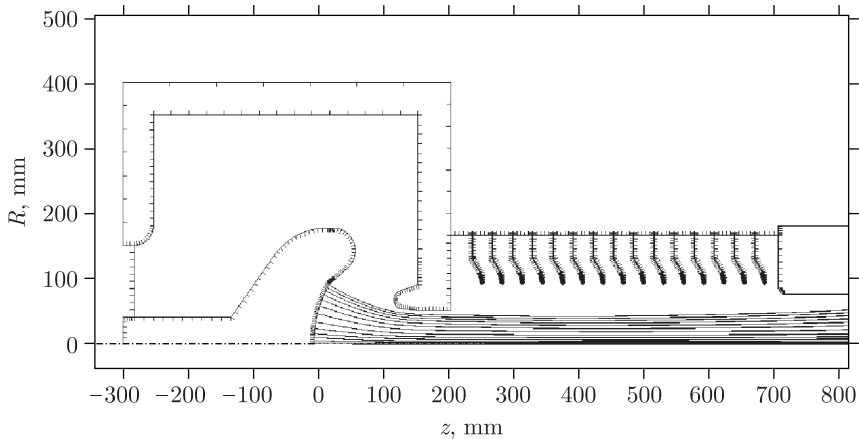


Рис. 2. Пример расчета диода ЛИУ-5 в UltraSAM

Из-за программных особенностей расчет динамики пучка в программе UltraSAM может быть выполнен только на ограниченной длине (примерно 15 м), чего недостаточно для более длинных систем. Таким образом, после расчета диода полученное распределение пучка может быть экспортировано в другие расчетные программы. В данном случае для расчета динамики пучка в ускорителе были применены PIC-код ASTRA [3], программа UltraSAM, а также новый код, использующий уравнение Капчинского–Владимирского (K-V envelope code). Сравнение моделирований электронного пучка с энергией 1,6 МэВ и током 1,5 кА на выходе из инжектора и нормализованным эмиттансом 1150 мм·мрад в ускорительном тракте ЛИУ-5 представлено на рис. 3. Амплитуда ускоряющего напряжения для каждого КУМ составила 360 кВ.

Распределение магнитных полей было взято из результатов измерений фокусирующих соленоидов на стенде магнитных измерений. Статические ускоряющие поля были рассчитаны в программе SLANS [4]. Моделирование в программе ASTRA осуществлялось со следующими основными параметрами: число разбиений сетки в области пучка  $75 \times 501$  (в программе ASTRA сетка разбивается только в области пучка), 1 000 000 макрочастиц с равномерным поперечным распределением и длительностью импульса 20 нс. Время моделирования при этом занимает около 4 ч. В UltraSAM

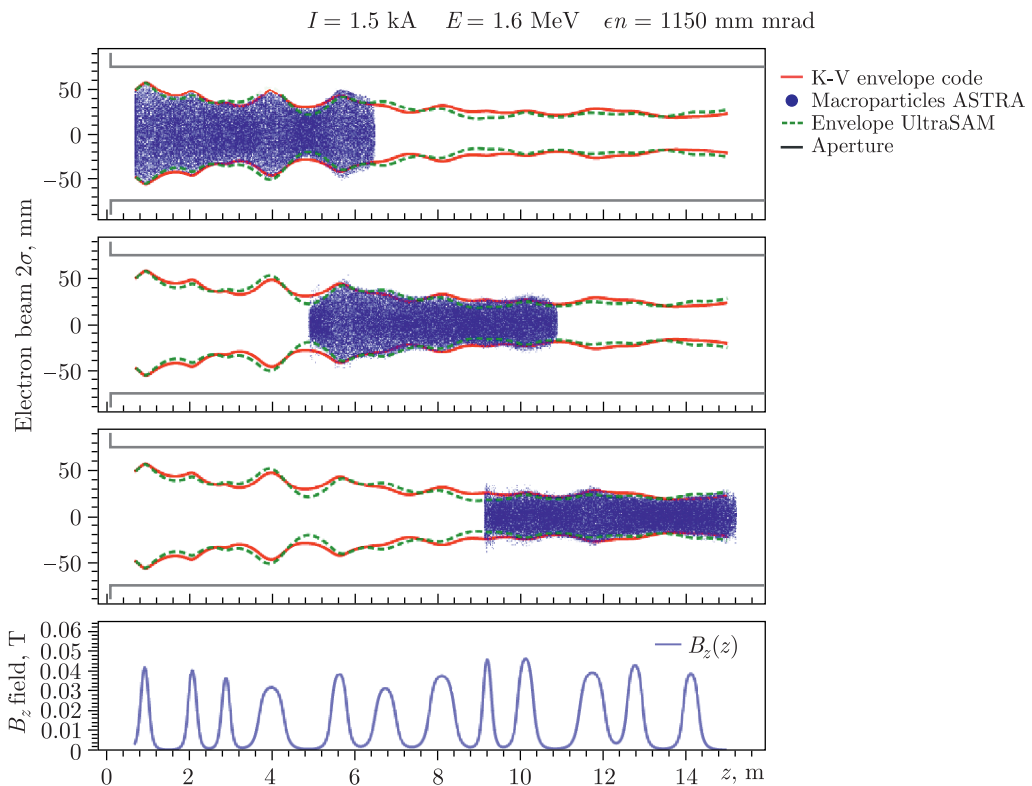


Рис. 3. Сравнение огибающих, рассчитанных с помощью кодов K-V envelope code, ASTRA, UltraSAM, в 15-м ускорительном тракте ЛИУ-5

(штриховая линия) моделирование с сеткой  $32 \times 640$  заняло 3 сут. В K-V envelope code (сплошная линия) интегрирование уравнения (1) с шагом 1 мм по  $z$  заняло несколько секунд. Из результатов моделирования видно, что есть хорошее соответствие между всеми кодами. Графики огибающих, приведенные на рис. 3, соответствуют полному токопрохождению по тракту ускорителя.

#### 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА ЛИУ-5

Важным фактором, влияющим на соответствие между экспериментом и моделированием, является ошибка выставки элементов как в самом диоде, так и в ускорительном тракте. Таким образом, встает вопрос об адекватном выборе начальных условий для моделирования динамики пучка. Простейшей процедурой восстановления начальных условий пучка может быть восстановление по измеренному поперечному размеру и эмиттансу [5]. Для измерения эмиттанса пучка применялся метод изменения размера пучка в зависимости от силы квадрупольной линзы. Для квадрупольного сканирования использовалась линза в дублете после 8-го ускоряющего модуля (см. рис. 1). Пучок с энергией 4,6 МэВ и током 1,5 кА регистрировался на люминофоре на расстоянии 16,8 м от катода. Пример полученного изображения пучка после квадрупольной линзы представлен на рис. 4, а. Уравнения Капчинского–Владимирского (2) для пучка в квадрупольном канале без ускоряющих полей можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} a'' + k_q a - \frac{2P}{(a+b)} - \frac{\epsilon_x^2}{a^3} = 0, \\ b'' - k_q b - \frac{2P}{(a+b)} - \frac{\epsilon_y^2}{b^3} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Предположим, что пучок после линейного ускорителя аксиально-симметричен и имеет одинаковые эмиттансы по обеим координатам. В этом случае уравнения (3)

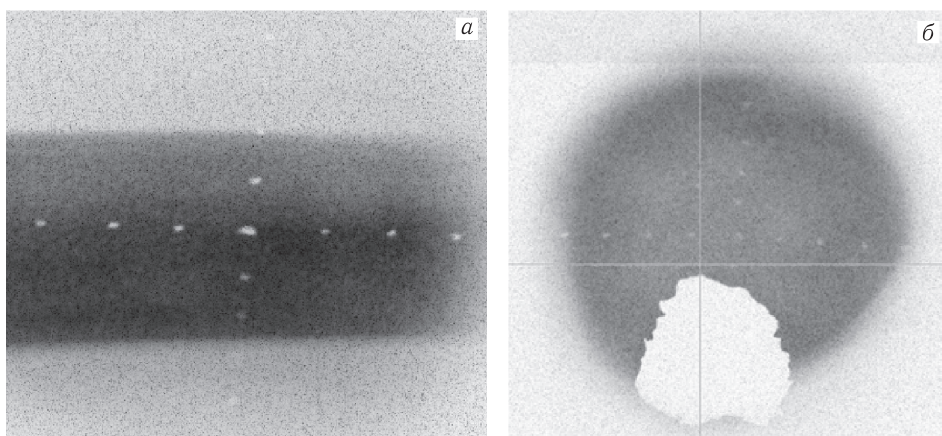


Рис. 4. Профили пучка на люминофоре после квадрупольной линзы (а) и после соленоидальной линзы (б)

имеют следующие начальные условия:  $a(0) = b(0)$ ,  $a'(0) = b'(0)$  и  $\epsilon_x = \epsilon_y$ . В таком случае можно вычислить поперечный размер пучка на люминофоре после квадруполья при известных начальных параметрах пучка. Таким образом, поперечный размер пучка и эмиттанс могут быть получены с помощью измерения профиля пучка как функции силы квадруполья и дальнейшей минимизации невязки:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(r_{i,\text{mod}} - r_{i,\text{meas}})^2}{\sigma_i^2}, \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  — ошибка в определении размера пучка в  $i$ -м измерении;  $N$  — количество измерений, а  $r_{i,\text{mod}}$  и  $r_{i,\text{meas}}$  — модельные и измеренные размеры соответственно. В качестве измеренных параметров был выбран размер малой полуоси изображения пучка на люминофоре. В качестве дополнительных измеренных величин можно использовать большие полуоси эллипса, но, к сожалению, для большинства измерений этот размер превышал размеры используемого люминофора. В качестве параметров модели были выбраны начальный размер пучка  $R(0)$ ,  $R'(0)$  и эмиттанс пучка  $\epsilon$ . Для точного определения модельного размера было измерено распределение магнитного поля в квадрупольной линзе в зависимости от питающего тока. В результате минимизации невязки был получен нормализованный эмиттанс  $(1150 \pm 100)$  мм · мрад.

Подобный метод измерения эмиттанса был использован в промежутке между 7-м и 8-м ускоряющими модулями (см. рис. 1). Была определена зависимость размера пучка от величины максимального поля в импульсной магнитной линзе, расположенной в этом же промежутке. В качестве неизвестных параметров пучка были выбраны размер и эмиттанс сразу после 7-го ускоряющего модуля. В параксиальном приближении с учетом влияния пространственного заряда, но без учета внешних электрических полей для огибающей пучка можно записать уравнение в виде

$$a'' + k_s a - \frac{P}{a} - \frac{\epsilon_x^2}{a^3} = 0, \quad (5)$$

где  $a = b$  — радиус пучка. Из уравнения (5) видно, что при изменении магнитного поля на участке движения пучка изменяется размер пучка на люминофоре при фиксированных начальных условиях.

Для определения зависимости размера пучка от величины магнитного поля была проведена серия измерений. Поле в аксиальной линзе в максимуме менялось от 814 до 1240 Гс (рис. 5). Нижняя граница диапазона ограничена тем фактором, что при

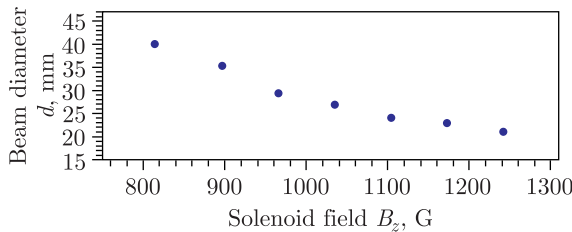


Рис. 5. Диаметр пучка на люминофоре как функция величины поля в центре соленоида на оси пучка

дальнейшем уменьшении поля размер пучка становится больше размера используемого люминофора. С другой стороны, верхняя граница ограничена максимальным напряжением на импульсном генераторе напряжения, от которого запитана линза. Вышеприведенное уравнение для огибающей пучка является дифференциальным уравнением второго порядка. Данное уравнение не имеет решения в квадратурах. Для его решения запишем разностную схему для второй производной:

$$R_n'' = \frac{R_{n+1} - 2R_n + R_{n-1}}{h^2}, \quad (6)$$

где  $h = z_n - z_{n-1}$ . В уравнении (5) три неизвестных параметра:  $a(0)$ ,  $a'(0)$  и эмиттанс пучка  $\epsilon_x$ . Решая численно уравнение и варьируя эти три параметра методом наименьших квадратов, можно получить значение эмиттанса пучка. Нулевая координата для продольной оси выбрана сразу после 7-й ускоряющей структуры. Такой выбор сделан по следующим причинам. Во-первых, пучок должен быть достаточно далеко от аксиальной магнитной линзы, чтобы начальные значения параметров пучка сохранялись при варьировании поля в линзе. Во-вторых, пучок не должен испытывать воздействие внешнего электрического поля ускоряющего модуля. Для данной геометрии задачи и определенной зависимости размера пучка от поля в линзе эмиттанс равен  $(1063 \pm 100)$  мм·мрад. Несколько завышенное значение измеренного эмиттанса по сравнению с расчетным можно объяснить тем, что в данном измерении учитывается интегральное по всей длительности пучка значение эмиттанса. Добавочное значение эмиттанса возникает за счет аббераций пучка в соленоидальных линзах. Пример изображения пучка на люминофоре показан на рис. 4, б. Дефект, который виден на изображении, появился из-за разрушения покрытия люминофора под воздействием мощного электронного пучка.

Для восстановления огибающей по экспериментальным данным для указанных параметров пучка был использован K-V envelope code и генетический алгоритм. Для реализации генетического алгоритма была использована библиотека DEAP [6, 7]. Принцип действия генетического алгоритма подобен естественному отбору. Есть популяция, состоящая из отдельных особей, функция приспособленности и штрафы. Вся популяция поддается мутациям и последующему отбору, при котором с помощью штрафов и функции приспособленности выделяются наиболее подходящие особи. Далее между ними происходит случайное скрещивание для восстановления популяции. Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет получено заранее предопределенное значение функции приспособленности.

Применительно к K-V envelope code в качестве особи был выбран вектор из 12 сил соленоидальных линз и трех начальных условий: радиуса, углового разлета и эмиттанса пучка. Стартовая популяция включала в себя 1500 особей, в которых магнитные поля  $B_z$ , радиусы  $r$ , угловые разлеты  $dr/dz$ , нормализованные эмиттансы  $\epsilon_n$  являлись гауссовыми случайными величинами со средними значениями  $\mu_{B_z} = 0,04$  Тл,  $\mu_r = 48$  мм,  $\mu_{dr/dz} = 38$  мрад,  $\mu_{\epsilon_n} = 1150$  мм·мрад и среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_{B_z} = 0,02$  Тл,  $\sigma_r = 24$  мм,  $\sigma_{dr/dz} = 20$  мрад,  $\sigma_{\epsilon_n} = 500$  мм·мрад соответственно. Функция приспособленности, подлежащая оптимизации, представляла собой квадратный корень из дисперсии от измеренного диаметра пучка при сканировании квадрупольной линзой. Задачей генетического алгоритма являлась минимизация суммы функции приспособленности.



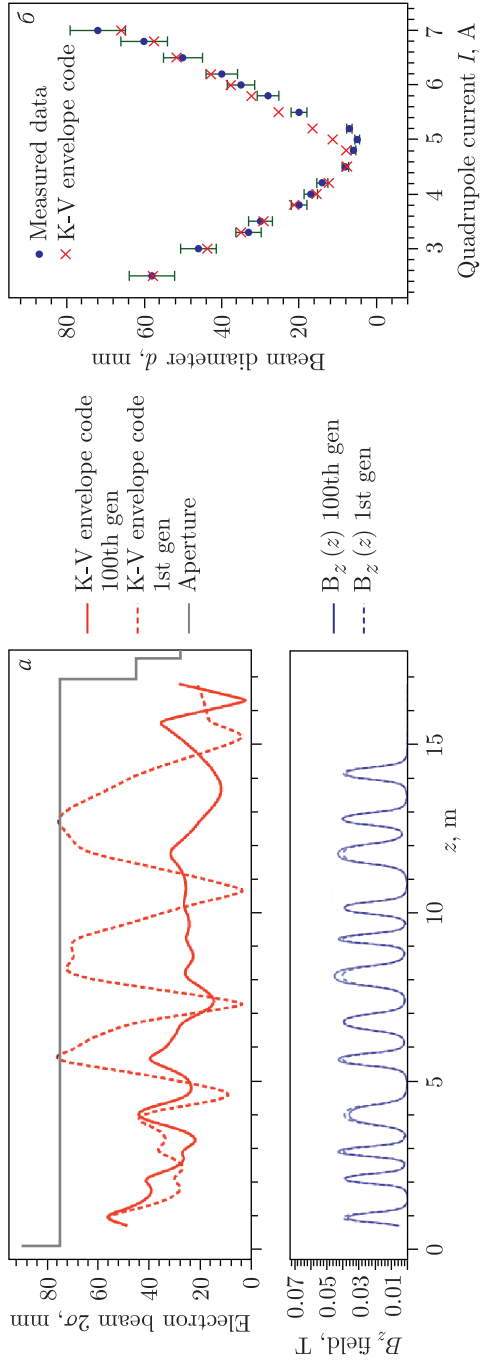


Рис. 6. Восстановленная огибающая и магнитное поле  $B_z(z)$  для 1-го и 100-го поколений соответственно (а), сравнение результатов моделирования с экспериментом (б) для тока 1,5 кА

С поставленной задачей генетический алгоритм справился за 100 поколений. Область эквивалентности по начальным условиям составила  $r = 42\text{--}49$  мм,  $dr/dz = 35\text{--}38$  мрад,  $\epsilon_n = 1125\text{--}1215$  мм·мрад. Восстановленные начальные условия были использованы при моделировании огибающей для сравнения с результатами измерений, эти данные представлены на рис. 6.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты моделирования транспортировки пучка в ускорителе ЛИУ-5 с помощью различных кодов. Разработан K-V envelope code на основе решения уравнения Капчинского–Владимирского. С помощью K-V envelope code и генетического алгоритма удалось восстановить огибающую электронного пучка по измеренным данным с люминофора. Получено хорошее совпадение для огибающей в 15-м ускорительном тракте ЛИУ-5 в сравнении с PIC-кодом ASTRA, программой UltraSAM и измеренными данными на люминофоре. Высокая скорость счета K-V envelope code, во много раз превосходящая ASTRA и UltraSAM, позволит в ближайшем будущем создать интерактивный интерфейс для настройки и проводки электронного пучка в более длинных и сложных ускорителях в режиме реального времени. Это существенно облегчит их настройку, сократив число тестовых импульсов, и тем самым увеличит производительность и срок службы установки.

Работа частично выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00212).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоусон Д. Д. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.
2. Ivanov A. V., Tiunov M. A. UltraSAM-2D Code for Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision // Proc. of EPAC-2002, Paris, 2002. P. 1634–1636.
3. Flöttmann K. ASTRA. Hamburg: DESY, 2000.
4. Myakishev D. G., Yakovlev V. P. An Interactive Code SUPERLANS for Evaluation of RF-Cavities and Acceleration Structures // Conf. Record of the 1991 IEEE Part. Accel. Conf., San Francisco, California, USA, 1991. V. 5. P. 3002–3004.
5. Yuan Hui Wu, Yu-Jiuan Chen, Ellsworth J. Unfolding Electron Beam Parameters Using Spot Size Measurement from Magnet Scan // Proc. of NAPAC2016, Chicago, IL, USA, 2016.
6. Rainville D. et al. Deap: A Python Framework for Evolutionary Algorithms // Proc. of the 14th Annual Conf. Companion on Genetic and Evolutionary Computation. ACM, 2012. P. 85–92.
7. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия — Телеком, 2013.

Получено 11 ноября 2019 г.