

Ю.К.Алексеев, А.М.Горохов, В.И.Шведунов

**ДИНАМИКА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ  
В ЛИНЕЙНОМ МИКРОУСКОРИТЕЛЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002-22/706

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

Ю.К.Алексеев, А.М.Горохов, В.И.Шведунов

**ДИНАМИКА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ  
В ЛИНЕЙНОМ МИКРОУСКОРИТЕЛЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002-22/706

УДК 621.039  
ББК 22.382  
А47

Ю.К.Алексеев, А.М.Горохов, В.И.Шведунов

E-mail: shved@depni.npi.msu.su

Yu.K.Alekseev, A.M.Gorokhov, V.I.Shvedunov

ELECTRON BEAM DYNAMICS IN LINEAR MICROACCELERATOR

Preprint INP MSU 2002-22/706

Abstract

Beam dynamics in an electron microaccelerator operating at wavelength 10  $\mu\text{m}$  have been studied starting from electron gun.

Ю.К.Алексеев, А.М.Горохов, В.И.Шведунов

ДИНАМИКА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ  
В ЛИНЕЙНОМ МИКРОУСКОРИТЕЛЕ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002-22/706

Аннотация

В настоящей работе произведен расчет динамики электронного пучка в ускоряющей структуре линейного ускорителя с длиной рабочей волны 10  $\mu\text{m}$ , причём рассмотрение движения частиц проводится с начальной стадии формирования потока в нерелятивистской электронной пушке.

© Ю.К.Алексеев, 2002  
© А.М.Горохов, 2002  
© В.И.Шведунов, 2002  
© НИИЯФ МГУ, 2002

## Введение.

Увеличение энергии электронного пучка за пределы  $\sim 1$  ТэВ, необходимое для дальнейшего прогресса физики высоких энергий, возможно лишь при существенном росте темпа набора энергии частиц по сравнению с достижимой на сегодняшний день величиной 50-100 МэВ/м. Поскольку градиент энергии в линейном ускорителе растет обратно пропорционально  $\sqrt{\lambda}$ , где  $\lambda$  - длина волны ускоряющего поля, то одним из путей увеличения темпа набора энергии является переход от современных длин волн электромагнитного поля порядка 0.2–0.01 м к  $\lambda \sim 10$   $\mu\text{м}$ , где существуют мощные CO<sub>2</sub> лазеры, способные обеспечить градиент энергии до 1-10 ГэВ/м. К настоящему времени предложены десятки схем лазерного ускорения (например работы [1],[2],[3]), однако во всех случаях рассматривается движение ультррелятивистского пучка с начиная с энергий 1–10 ГэВ, проблема же формирования коротких сгустков длиной 1  $\mu\text{м}$  и менее в рамках концепции лазерного ускорения оставалась за рамками обсуждаемых вопросов.

В настоящей работе произведен расчет динамики электронного пучка в ускоряющей структуре линейного ускорителя с длиной рабочей волны 10  $\mu\text{м}$ , причём рассмотрение движения частиц проводится с начальной стадии формирования потока в нерелятивистской электронной пушке. В качестве источника электронов используется автоэмиссионный катод, пушка формирует пучок с малым эмиттансом и энергией частиц около 50 кэВ. Формирование сгустков электронов и их дальнейшее ускорение осуществляется в электродинамической структуре гребенчатого типа с переменной длиной ячеек, выбранной из условия получения максимального коэффициента захвата частиц в ускоряемый сгусток. Наряду с продольной динамикой сгустка рассматривается также и поперечная динамика пучка.

### 1. Электронная пушка.

Требования к электронной пушке определяются аксептансом ускоряющей структуры и величиной заряда сгустка, которую необходимо получить на выходе из ускорителя. Для оценки аксептанса линейного микроускорителя, состоящего из 20 ячеек и группирователя, аппроксимируем ускоряющую структуру участком дрейфа длиной  $L = 400$   $\mu\text{м}$  с радиусом апертуры входного и выходного отверстий  $a = 1$   $\mu\text{м}$  (рис. 1а). Аксептанс данного пространства дрейфа выражается через площадь параллелограмма (1) (рис. 1б).

$$A = S/\pi = 2a\alpha/\pi = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \cdot \text{мрад} \quad (1)$$

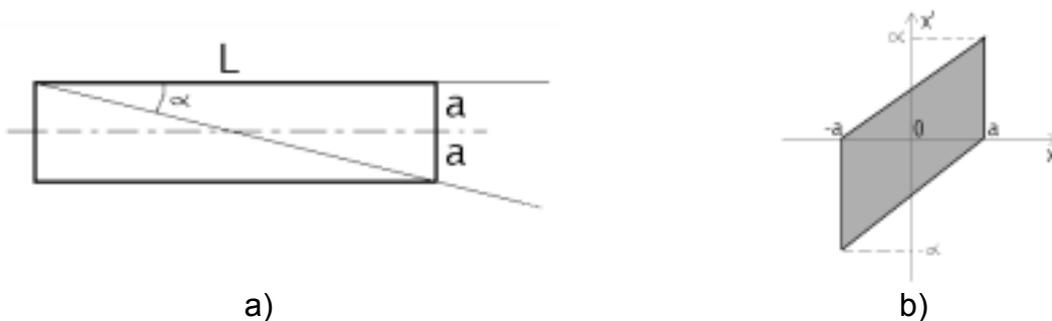


Рисунок 1. Аппроксимирующее пространство дрейфа (а) и аксептанс микроускорителя (б).

Величина геометрического (ненормализованного) эмиттанса  $\varepsilon$  электронной пушки должна быть существенно меньше акцептанса,  $\varepsilon \ll 1.6 \cdot 10^{-3}$  мм·мрад. Необходимо принять во внимание, что в процессе ускорения сгустка конкурируют процессы увеличения эмиттанса из-за зависящих от времени электромагнитных полей и его уменьшения вследствие роста продольного импульса частиц.

Для получения электронного пучка с малым эмиттансом был произведен расчет электронной пушки, состоящей из автоэмиссионного катода и трех электродов под разными потенциалами. Катод пушки состоит из тонкой круглой в поперечном сечении иглы диаметром 70  $\mu\text{m}$  (рис. 2а, 2б), радиус острия иглы равен 35  $\mu\text{m}$ . В центре острия имеется углубление радиуса 0.1  $\mu\text{m}$  (рис. 2в), с краев которого за счет высокой напряженности поля в этом месте эмиттируются электроны. Катод окружен экранирующим цилиндрическим электродом.

Схема электронной пушки показана на рис. 2, потенциалы на электродах заданы следующие:  $V_0=0$  кВ,  $V_1=3$  кВ,  $V_2=6$  кВ,  $V_3=50$  кВ. Расстояния между электродами подбирались с таким расчетом, чтобы паразитная емкость пушки была мала и электрическое поле могло достаточно быстро сформироваться при подаче импульсного напряжения на электроды. Кроме того, межэлектродное расстояние должно быть достаточно большим, чтобы избежать пробоя вакуума между электродами. Положение электрода с потенциалом  $V_1$  было задано производителем катода и при оптимизации пушки не менялось.

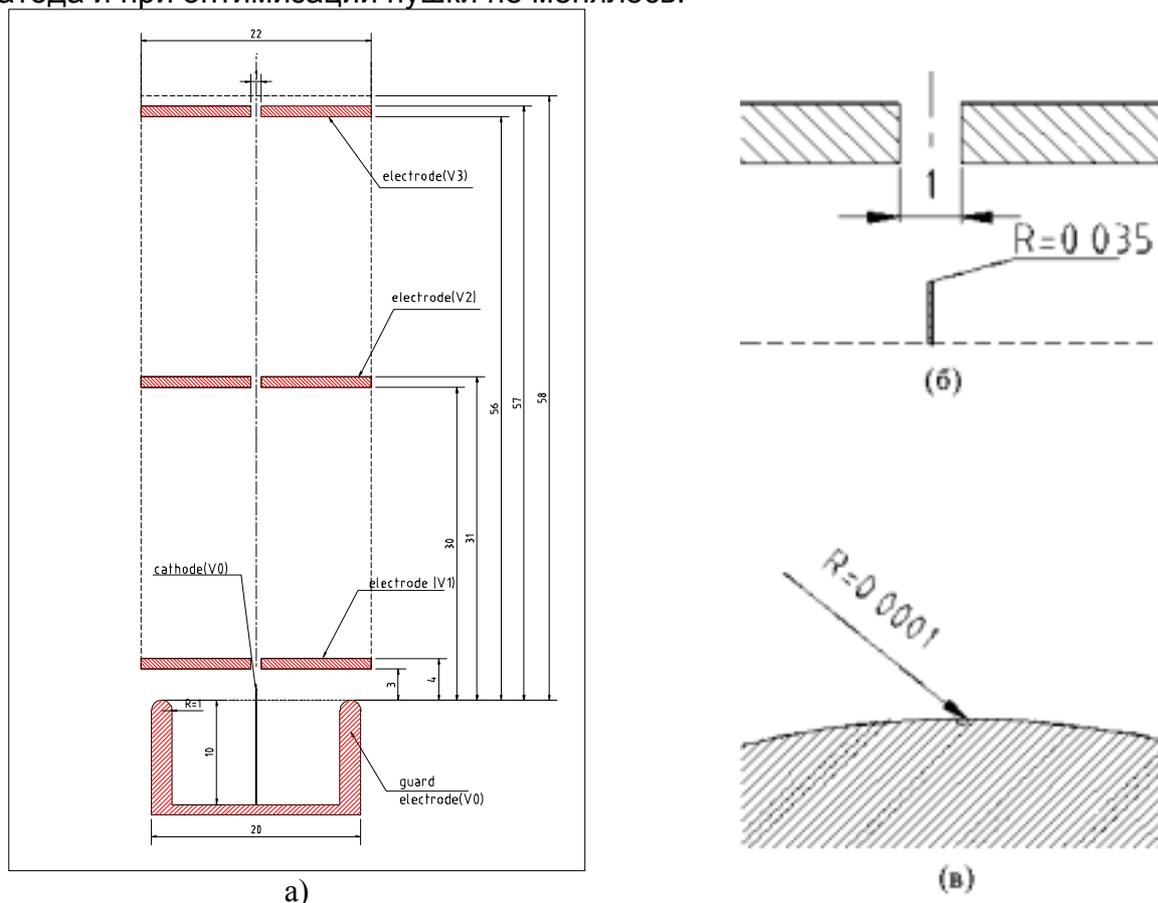


Рисунок 2. Автоэмиссионная электронная пушка: общий вид (а), область вблизи катодного острия (б), эмиттирующее микроуглубление на поверхности острия (в). Все размеры даны в мм.

Паразитная емкость трехэлектродной пушки с размерами, указанными на рис. 2, составляет около 0.065 пФ, что соответствует времени установления

электрического поля между электродами порядка 3.25 пс. Этого достаточно, чтобы пушка работала с импульсами длительностью 100 пс.

Работа пушки основана на автоэлектронной эмиссии, которая на поверхности катода может создавать электронный ток с большой локальной плотностью [4]. Ток и конфигурация электронного пучка определяются прежде всего электрическим полем вблизи вершины эмиттирующего выступа. При заданной кольцевой конфигурации катода и гарантированным производителем полным током 100 мкА напряженность поля вблизи излучающей кромки катода достигает  $E \approx 6 \cdot 10^9$  В/м. Углы вылета электронов, эмиттируемых с катода, могут составлять величину до  $20^\circ$ - $30^\circ$  [5].

## 2. Расчет электрического поля в электронной пушке.

Исследование распределения потенциала внутри полостей электронной пушки производилось на основе программы HEAT2 [6], использующей неравномерную пространственную сетку, в узлах которой рассчитывались значения потенциалов поля. В качестве исходных данных были заданы расположение электродов и величины потенциалов на них. Программа численно решала уравнение Лапласа с заданными граничными условиями, в качестве выходных данных выдавалось распределение электрического потенциала на продольной оси Z внутри полости пушки. Для расчетов электронной пушки в HEAT2 использовалась конфигурация электродов, показанная на рис. 3.

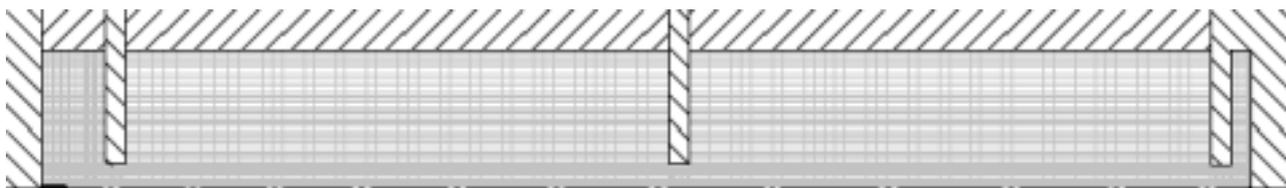


Рисунок 3. Профиль электронной пушки с наложенной сеткой, использовавшейся в расчетах.

Полученное распределение электрического потенциала на продольной оси Z электронной пушки показано на рис. 4.

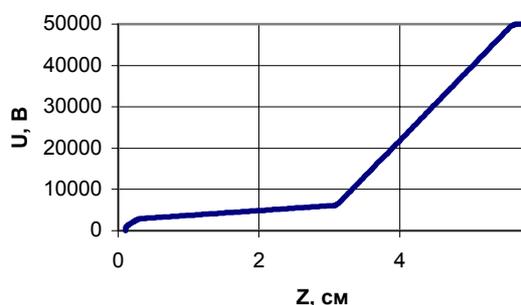


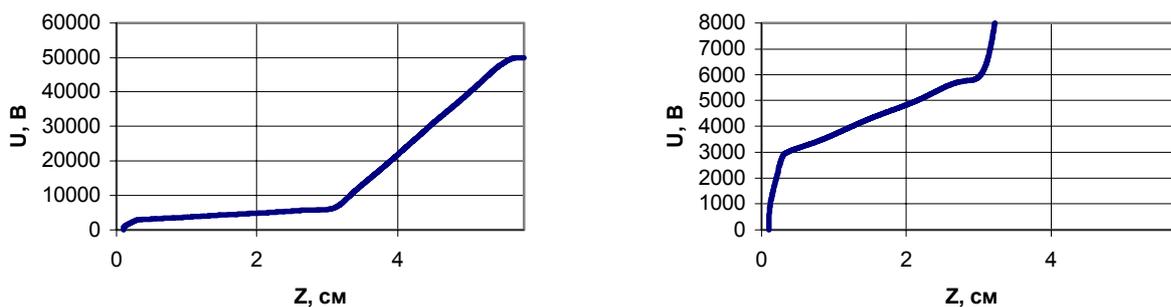
Рисунок 4. Распределение электрического потенциала на оси Z.

Поскольку предполагалось, что пучок электронов движется вблизи продольной оси ускорителя, то в расчёте потенциала было использовано параксиальное приближение. В этом случае компоненты электрического поля на

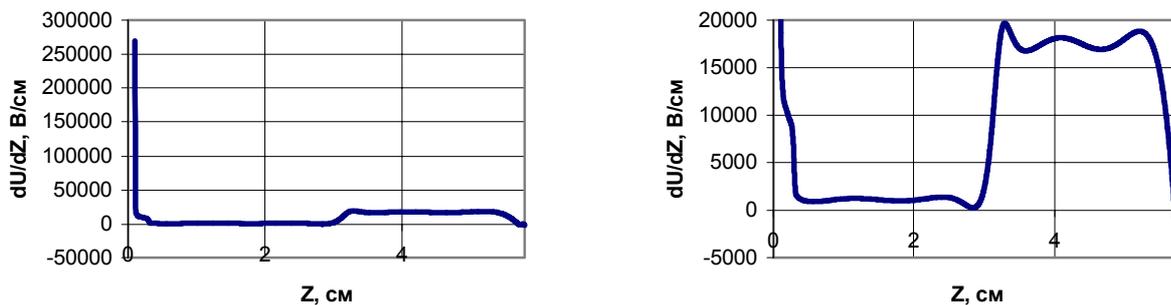
расстоянии  $r$  от оси  $Z$  определяются распределением электрического потенциала (2) на оси  $Z$ .

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{4} \frac{\partial^3 V}{\partial z^3} r^2, \quad E_r = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} r - \frac{1}{16} \frac{\partial^4 V}{\partial z^4} r^3 \quad (2)$$

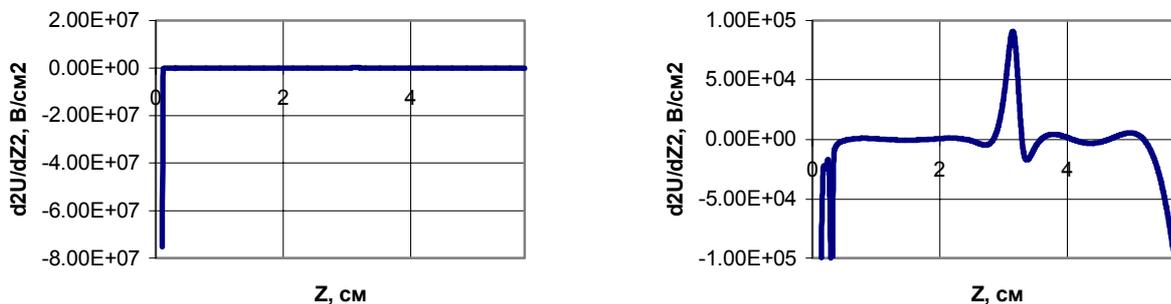
Для нахождения производных  $V$ ,  $\partial V/\partial z$ ,  $\partial^2 V/\partial z^2$ ,  $\partial^3 V/\partial z^3$ ,  $\partial^4 V/\partial z^4$  использовалось сплайн-дифференцирование полученного при расчете электронной пушки дискретного распределения потенциала на оси  $Z$  [7]. В качестве сплайн-функций использовался набор полиномиальных кривых, описываемых многочленами 6-го порядка. Распределение потенциала на оси  $Z$  и его производные показаны на рис. 5.



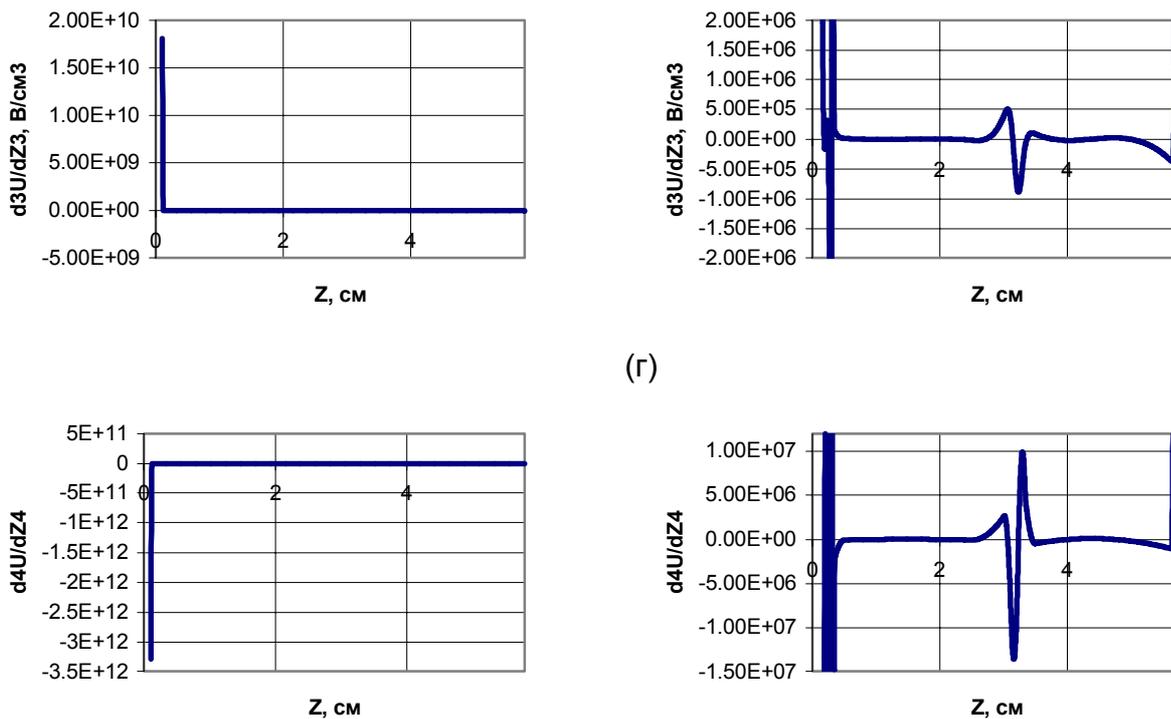
(a)



(б)



(B)



(г)

(д)

Рисунок 5. Распределение (а) -  $V$ , (б) -  $\partial V/\partial z$ , (в) -  $\partial^2 V/\partial z^2$ , (г) -  $\partial^3 V/\partial z^3$ , (д) -  $\partial^4 V/\partial z^4$  вдоль оси  $Z$  электронной пушки (справа изображены графики в увеличенном масштабе).

Полученные данные о распределении поля и его производных в приосевом межэлектродном пространстве были использованы в последующем анализе движения заряженных частиц в электронной пушке.

### 3. Динамика пучка электронов в электронной пушке.

Для решения уравнений движения электронов использовался стандартный алгоритм интегрирования дифференциальных уравнений движения методом Рунге-Кутты [8]. Уравнение движения использовалось в виде (3).

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{e}{m_0 \gamma} (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} - \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}}{c^2} \mathbf{V}) \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{V}$  – скорость электрона,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  – напряжённости электрического поля и магнитная индукция соответственно,  $c$  – скорость света в вакууме,  $e$  и  $m_0$  – заряд и масса покоя электрона,  $\gamma$  - релятивистский фактор.

Влияние пространственного заряда в рассматриваемой задаче не учитывалось, поскольку количество электронов, эмиттируемых с катода за период работы ускоряющей структуры, составляет порядка 100 и силы, действующие на отдельно взятый электрон со стороны других электронов в его окрестности, невелики.

Ансамбль частиц участвующий в расчетах был получен следующим образом: частицы генерировались в кольце радиуса  $0.1 \mu\text{m}$  с гауссовым распределением в радиальном направлении и среднеквадратичным отклонением  $\sigma=0.01 \mu\text{m}$ ; начальная продольная координата всех частиц соответствовала координате острия катода, углы между вектором скорости и осью  $Z$  для всех частиц равномерно распределены

в интервале  $(-2.8^\circ, +2.8^\circ)$ , распределение начальной энергии определялось гауссовым законом со средним значением 1 эВ и  $\sigma=0.1$  эВ. Всего было сгенерировано 1000 частиц, каждая из которых имеет заряд электрона. Поперечный разрез и фазовые портреты пучка на катоде показаны на рис. 6.

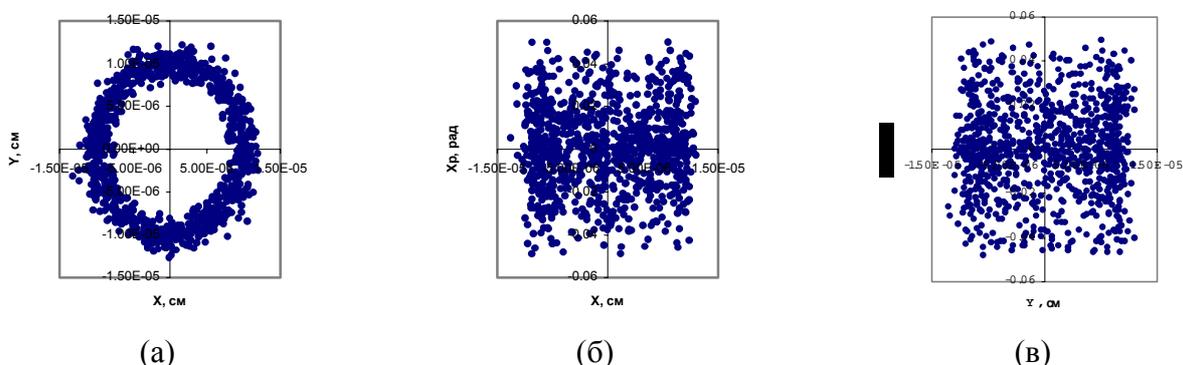


Рисунок 6. Электронный пучок в начале расчета: поперечный срез пучка (а), поперечные фазовые портреты (б), (в) для x и y плоскостей.

Среднеквадратичные эмиттансы, характеризующие сгенерированный пучок, показаны в Таблице 1 (с индексом N – нормализованный эмиттанс).

Таблица 1. Значения среднеквадратичных эмиттансов пучка, сгенерированного на катоде.

Величина	Значение
$\epsilon$	$1.44 \cdot 10^{-3}$ мм*мрад
$\epsilon^N$	$2.86 \cdot 10^{-6}$ мм*мрад

На рис. 7 приведены результаты расчета динамики пучка в электронной пушке. Как видно из рисунка, пучок после ускорения до энергии 50 кэВ является сходящимся, что объясняется конфигурацией электродов, действующих подобно электростатической линзе [9].

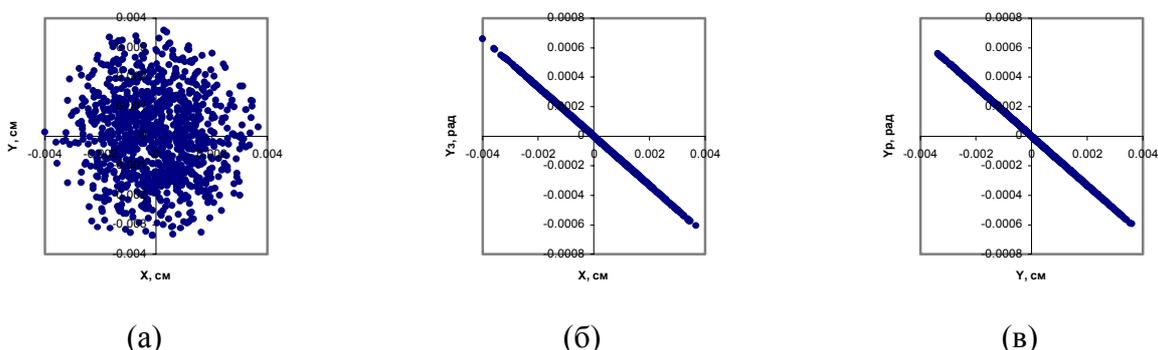


Рисунок 7. Пучок на выходе из электронной пушки: поперечный срез пучка (а), поперечные фазовые портреты (б), (в) для x и y плоскостей.

Среднеквадратичные эмиттансы и параметры Твисса, характеризующие полученный пучок на выходе из пушки, показаны в Таблице 2.

Таблица 2. Параметры пучка на выходе из пушки.

Величина	Значение
$\varepsilon^N$	$5.78 \cdot 10^{-6}$ мм*мрад
$\varepsilon$	$1.28 \cdot 10^{-5}$ мм*мрад
$\alpha$	1746.5
$\beta$	105.6 мм/мрад

Проследить темп набора энергии пучка электронов внутри электронной пушки можно на рис. 8, где изображена зависимость энергии пучка от пройденного расстояния. Рост нормализованного эмиттанса примерно в 2 раза обусловлен влиянием аберраций, учитываемых за счет квадратичного и кубического членов уравнения (2).

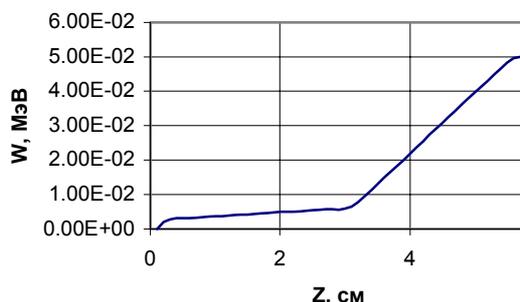
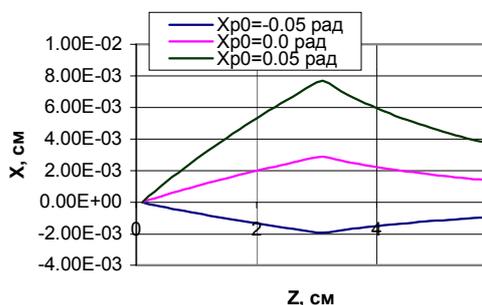
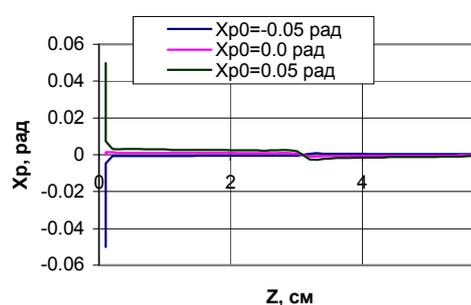


Рисунок 8. Изменение энергии пучка в электронной пушке.

На рис. 9а представлены траектории электронов для случаев, когда они вылетают с разными углами с катода. Из этих рисунков видно, сгенерированный пучок является пространственно сходящимся. Электроны, траектории которых показаны на рис. 9а, были эмиттированы из точки  $x=0.1$  мкм,  $y=0.0$  мкм. Поскольку движение частиц в пушке обладает аксиальной симметрией, то данные графики дают представление о движении электронного пучка в целом. Зависимость угла наклона траектории частиц от пройденного расстояния вдоль оси Z представлена на рис. 9б.



(а)



(б)

Рисунок 9. Траектории электронов (а), вылетевших с разным угловым отклонением, зависимость угла наклона траектории частиц (б) от пройденного расстояния.

#### 4. Согласование эмиттанса пушки и аксептанса ускоряющей структуры.

Пучок с полученными параметрами имеет кроссовер на расстоянии около 6.05 см после вылета из пушки. С полученной угловой расходимостью  $\approx 0.6$  мрад и диаметром менее 1  $\mu\text{м}$  в районе кроссовера пучок может пролететь без токооседания в трубе дрейфа длиной 1 мм с апертурой отверстия 1  $\mu\text{м}$  при условии, что кроссовер пучка будет находиться в середине области дрейфа.

Полученный на выходе из электронной пушки пучок попадает в ускоряющую структуру, расположенную на таком расстоянии от пушки, чтобы кроссовер пучка находился в самом начале этой структуры. Это необходимо для того, чтобы при движении пучка в ускоряющей структуре поперечные размеры пучка были минимальными по мере прохождения структуры. Характер движения электронного пучка в ускоряющей структуре отличается от движения пучка в пространстве дрейфа наличием переменного электромагнитного поля структуре, этим и обусловлена разница в выборе положения кроссовера электронного пучка. В Таблице 3 показаны параметры пучка в кроссовере.

Таблица 3. Параметры пучка в кроссовере.

$\alpha_{x,y}$	0.0
$\beta_{x,y}$	$28.95 \cdot 10^{-6}$ мм/мрад
$\epsilon_{x,y}$	$1.34 \cdot 10^{-5}$ $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$
Радиус пучка	0.02 $\mu\text{м}$
Расходимость пучка	0.575 мрад

Эти параметры были использованы в дальнейших расчетах динамики пучка в ускоряющей структуре с помощью программы PARMELA.

#### 5. Расчет ускоряющей структуры

Для расчёта электромагнитного поля в ячейках ускоряющей структуры использовалась возможность программы PARMELA синтезировать поля на основе коэффициентов Фурье, описывающих формы полей в ускоряющих ячейках разной длины, зависящей от скорости пучка  $\beta c$ . Параметры  $\beta c$  выбирались на необходимом интервале скоростей с некоторым шагом, равномерно покрывая этот интервал. Форма электромагнитного поля ячейки произвольной длины определялась методом интерполяции.

Сами формы полей для набора ускоряющих ячеек были рассчитаны с помощью программы SUPERFISH, полученные формы полей анализировались в программном пакете MATHCAD и там же рассчитывались коэффициенты Фурье.

Метод определения длин ячеек состоял из следующих этапов:

1. Из кинетической энергии  $W_k$  пучка после прохождения  $n-1$  ячейки находилась скорость пучка по формуле  $\beta c = c \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$ , где  $\gamma = 1 + W/W_0$ ,  $W_0 = 0.511$  МэВ - энергия покоя электрона.

2. Далее предполагалось, что опорная частица должна влететь в область максимума поля ячейки в фазе  $90^\circ$ . Поле внутри ускоряющего зазора выходит за его пределы вследствие проникновения его в запредельные отверстия диафрагм, где его амплитуда экспоненциально спадает с увеличением расстояния от зазора. Поэтому было необходимо рассматривать электромагнитное поле не только внутри

зазора, но и по всей длине ускоряющей ячейки. В пренебрежении интерференцией полей разных ячеек область действия поля была ограничена размерами самой ячейки. Схематично ячейка изображена на рис. 10.

Длины диафрагм  $L_I$  и  $L_{III}$ , которые должны экранировать электромагнитное поле вычислялись по оценочным формулам:  $L_I=0.25\beta_{Ic}T$ ,  $L_{III}=0.25\beta_{IIIc}T$ , где  $\beta_{Ic}$ ,  $\beta_{IIIc}$  - скорости опорной частицы в соответствующих диафрагмах.

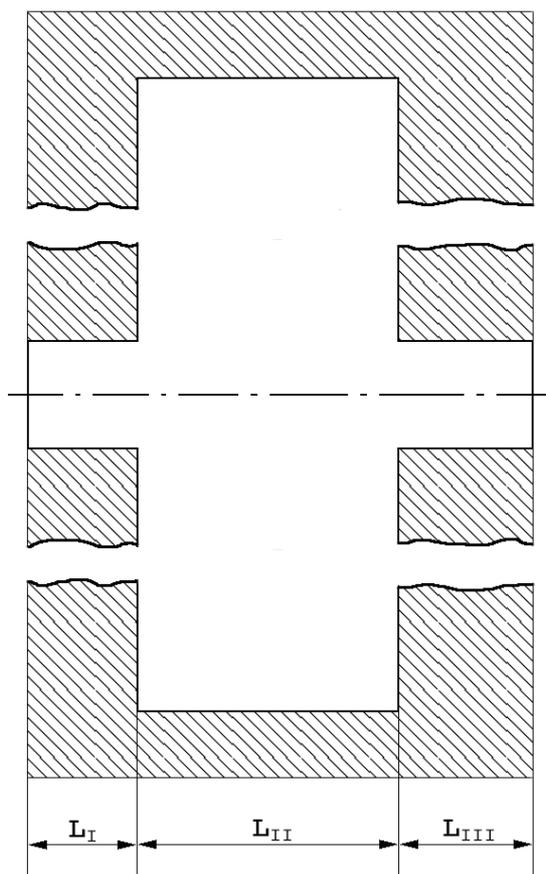


Рисунок 10. Примерная форма ускоряющего зазора и отверстий в прилегающих диафрагмах.

3. Длина ускоряющего зазора оценивалась по формуле  $L_{II}=0.5\beta_{IIc}T$ , где  $\beta_{IIc}$  - средняя скорость опорной частицы в зазоре.

4. В предположении, что опорная частица ускоряется только внутри зазора, и пренебрегая влиянием краевых полей, получаем приращение скорости  $\Delta\beta c$  и величину  $\beta_{IIc} = \beta_{Ic} + \Delta\beta c / 2$ .

5. При этом величина  $\Delta\beta c$  находилась из прироста кинетической энергии опорной частицы при прохождении внутри зазора по формуле (4).

$$\Delta W = eE_0 \int_0^{L_{II}} \phi_z(z) dz \quad (4)$$

Здесь  $E_0=10^8$  В/см – амплитуда продольной составляющей электрического поля в зазоре,  $\phi_z(z)$  – распределение поля в зазоре (нормированное на 1, поэтому величина безразмерная).  $\Delta W$  в случае постоянного поля в ячейке составляет около 45 кэВ. Учёт зависимости поля от фазы снижает прирост энергии примерно до 30 кэВ.

6. Зная  $\Delta W$ ,  $\Delta\beta c$  находилось по формуле (5).

$$\Delta\beta c = c \left( \sqrt{1 - \frac{W_0^2}{(W_0 + W_I + \Delta W)^2}} - \sqrt{1 - \frac{W_0^2}{(W_0 + W_I)^2}} \right) \quad (5)$$

7. Параметры ячеек для скоростей от 0.46c до c представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Параметры ячеек для разных скоростей опорной частицы.

$\beta_I$	$\beta_{II}$	$\beta_{III}$	$W_I$ , МэВ	$L_I$ , $\mu\text{м}$	$L_{II}$ , $\mu\text{м}$	$L_{III}$ , $\mu\text{м}$
0.462	0.5	0.538	0.065	1.155	2.5	1.345
0.519	0.55	0.581	0.087	1.298	2.75	1.452
0.675	0.6	0.625	0.114	1.438	3	1.562
0.63	0.65	0.67	0.147	1.575	3.249	1.674
0.667	0.7	0.684	0.19	1.713	3.501	1.789
0.739	0.75	0.762	0.247	1.848	3.751	1.904
0.792	0.8	0.808	0.326	1.98	4	2.02
0.845	0.85	0.855	0.445	2.112	4.25	2.138
0.897	0.9	0.902	0.645	2.243	4.499	2.256
0.949	0.95	0.951	1.11	2.373	4.75	2.377
1	1	1	-	2.5	5	2.5

Пример рассчитанной формы ячейки и распределения продольной составляющей электрического поля в ней для скорости  $\beta=0.5$  представлены на рис. 11.

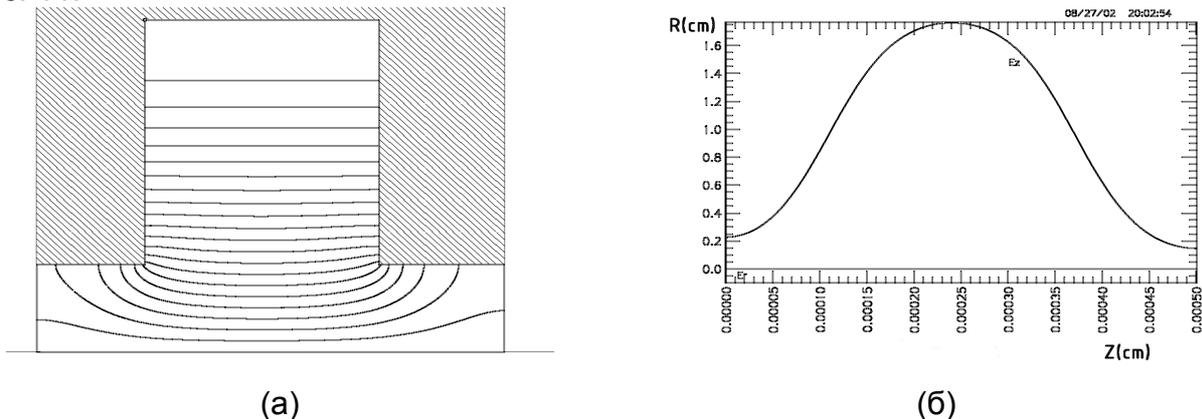


Рисунок 11. Форма ячейки для скорости опорной частицы в центре зазора  $\beta=0.5$  (а), распределение продольной составляющей электрического поля в ячейке (б).

На краях ячейки в представленном случае наложены граничные условия Неймана (магнитные стенки). При расчете ускоряющей структуры использовались параметры ячеек из Таблицы 4 и параметры структуры из Таблицы 5.

Таблица 5. Параметры ускоряющей структуры.

Апертура (радиус)	1 $\mu\text{м}$
Амплитуда прод. составляющей электрического поля на оси Z в максимуме поля для ячейки с $\beta=1$	$104 \cdot 10^6$ В/см
Амплитуда продольной составляющей электрического поля на оси Z в максимуме поля для группирователя	$6.4 \cdot 10^6$ В/см
Рабочая частота ускоряющей структуры	$3 \cdot 10^{13}$ Гц

Распределение амплитуды электрического поля вдоль оси Z для 20 ячеек и группирователя перед ними представлено на рис. 12.

Параметры пучка на входе в ускоряющую структуру находились на основе параметров пучка, полученных из результатов расчета динамики пучка в электронной пушке ( Таблица 3). Как показали расчеты, потери частиц выше в том случае, когда кроссовер пучка расположен непосредственно перед группирователем. В случае же, если кроссовер расположить в середине ускоряющей структуры, потери частиц возрастают.

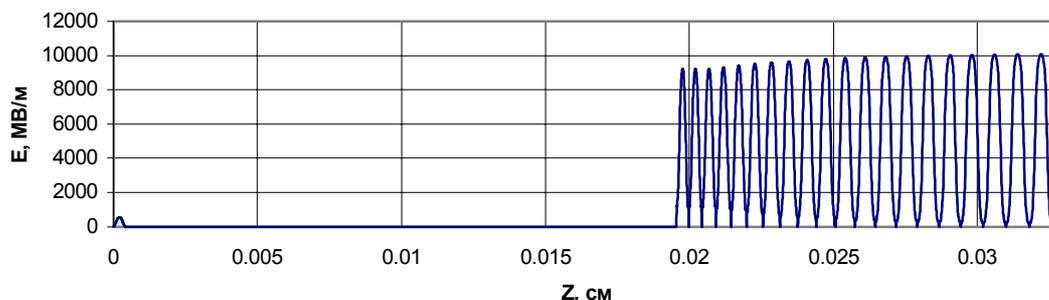


Рисунок 12. Распределение продольной составляющей электрического поля вдоль оси Z для 20 ячеек и группирователя.

Параметры пучка, примененные в расчетах в программе PARMELA на входе в ускоритель, показаны в Таблице 6.

Таблица 6. Начальные параметры пучка.

Параметр	Значение
$\alpha_{x,y}$	0.0
$\beta_{x,y}$	$29.85 \cdot 10^{-6}$ мм/мрад
$\epsilon_{x,y}$	$1.34 \cdot 10^{-5}$ мм*мрад
$\Delta\phi$	$180^\circ$
E	50 кэВ
$\Delta E$	0.1 кэВ

Всего в расчетах рассматривалось 20 ячеек структуры. Параметры ячейки рассчитывались следующим образом. Длина ячейки подбиралась с таким требованием, чтобы опорная частица влетала в середину ускоряющего зазора с полем в фазе  $90^\circ$ . При выполнении этого условия опорная частица получала максимальный прирост энергии в ячейке. Небольшое торможение частицы возникало только при влете частицы в ячейку, когда частица попадала в область действия паразитного краевого поля в момент тормозящей фазы. Аналогичный эффект происходил и на выходе из ячейки. Однако эти потери не столь значительны (порядка 10%) по сравнению с величиной набора энергии в ячейке. Параметры ячеек представлены в Таблице 7.

Максимальная амплитуда продольной составляющей электрического поля вдоль оси Z для всех ячеек полагалась равной величине  $104 \cdot 10^6$  В/см.

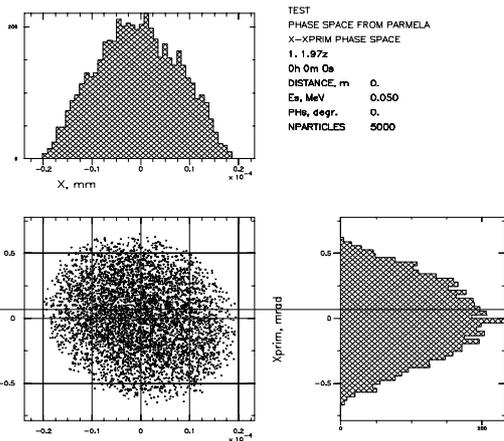
Таблица 7. Параметры ускоряющей структуры (расстояния заданы относительно начала первой ускоряющей ячейки).

Номер ячейки	Z координата начала ячейки, $\mu\text{м}$	Z координата окончания ячейки, $\mu\text{м}$	Длина ячейки, $\mu\text{м}$
1	0	4.26	4.26
2	4.26	8.86	4.60
3	8.86	13.73	4.87
4	13.73	18.89	5.16
5	18.89	24.31	5.42
6	24.31	29.99	5.68
7	29.99	35.92	5.93
8	35.92	42.09	6.17
9	42.09	48.49	6.40
10	48.49	55.12	6.63
11	55.12	61.94	6.82
12	61.94	68.95	7.01
13	68.95	76.16	7.21
14	76.16	83.52	7.36
15	83.52	91.05	7.53
16	91.05	98.72	7.67
17	98.72	106.52	7.80
18	106.52	114.45	7.93
19	114.45	122.51	8.06
20	122.51	130.70	8.19

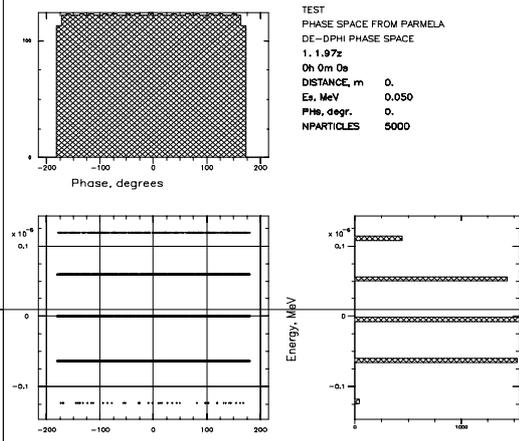
## 6. Динамика сгустка электронов в ускоряющей структуре

В качестве группирователя использовались ячейка, модулирующая скорости электронов, и трубка дрейфа, где происходила группировка частиц в сгустки. Длина ячейки  $1.5 \mu\text{м}$  (эта величина включает в себя зазор и краевые поля вокруг него), амплитуда поля в группирователе на порядок ниже, чем в других ускоряющих ячейках [10], это достигается за счёт выноса модулирующего зазора за каустику луча лазера, облучающего структуру. Малая амплитуда поля в группирователе необходима для того, чтобы разброс по энергиям у частиц на выходе из группирователя был невелик. Длина пространства дрейфа между группирователем и первой ячейкой ускоряющей структуры подбиралась таким образом, чтобы, во-первых, сгусток электронов, попадающий в первую ячейку был максимально сгруппирован в продольной плоскости и, во-вторых, чтобы опорная частица влетала в центр зазора первой ускоряющей ячейки в момент действия тормозящей фазы переменного поля (опорная частица в расчетах влетает в первую и последующие ячейки в фазе  $270^\circ$ ). Результаты полученной группировки приведены на рис. 13-16, где представлены продольные и поперечные (только для x-плоскости) фазовые портреты ускоряемого потока частиц.

Как видно из этих рисунков, около половины всех частиц отстали более, чем на  $15^\circ$  по фазе относительно опорной частицы или осели на стенках структуры. Для остальных частиц фазовые портреты пучка после 20-ой ячейки показаны на рис. 16.

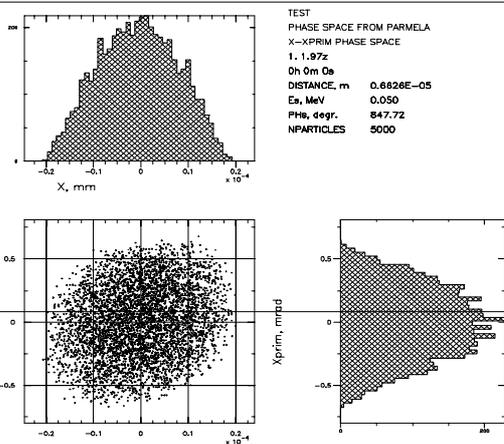


(a)

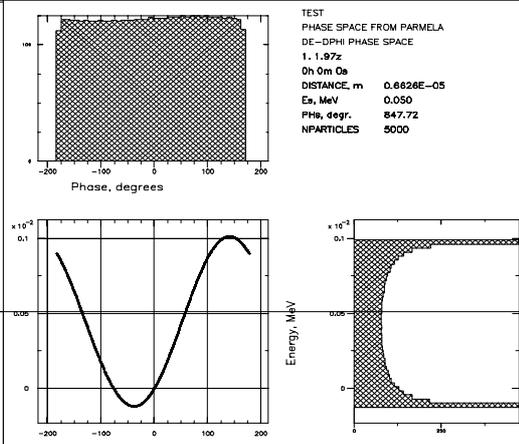


(б)

Рисунок 13. Поперечный (а) и продольный (б) фазовый портрет сгустка перед влётом в группирователь.

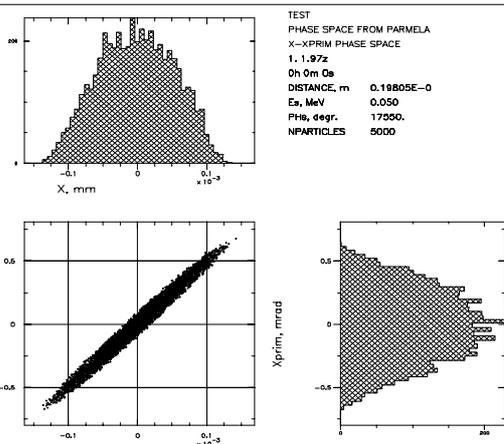


(a)

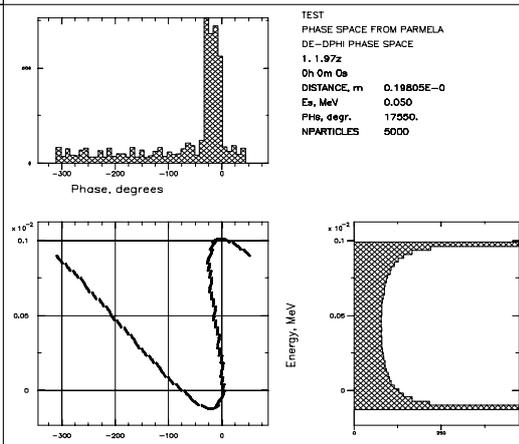


(б)

Рисунок 14. Поперечный (а) и продольный (б) фазовый портрет сгустка после группирователя.

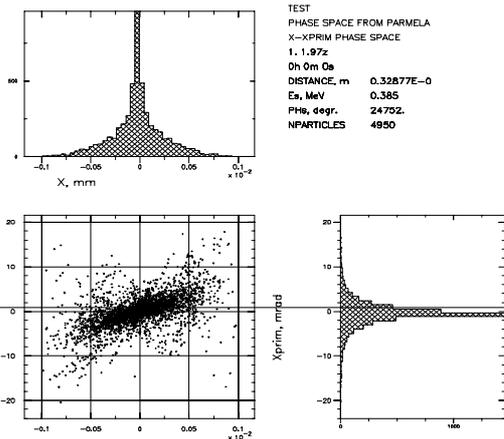


(a)

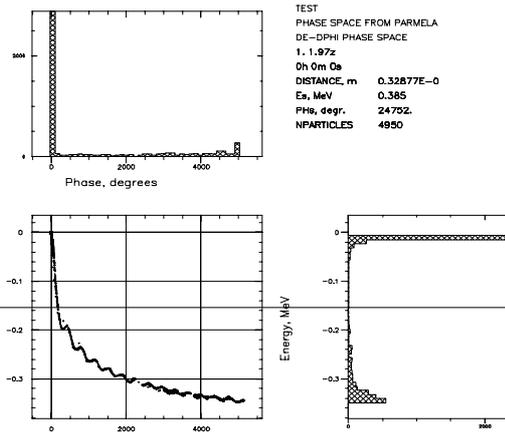


(б)

Рисунок 15. Поперечный (а) и продольный (б) фазовый портрет сгустка в конце пространства дрейфа.

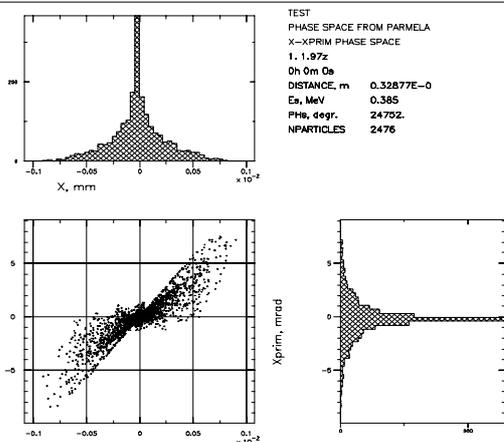


(a)

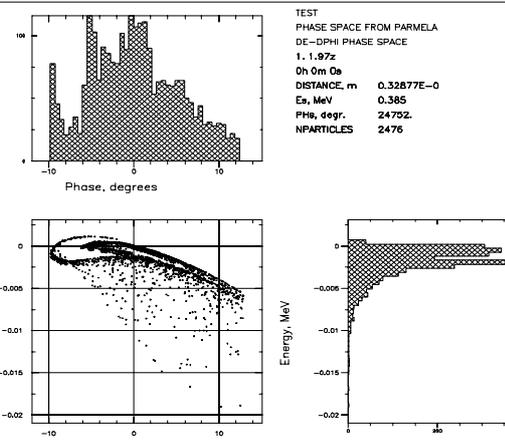


(б)

Рисунок 16. Поперечный (а) и продольный (б) фазовый портрет сгустка после ускоряющей структуры.



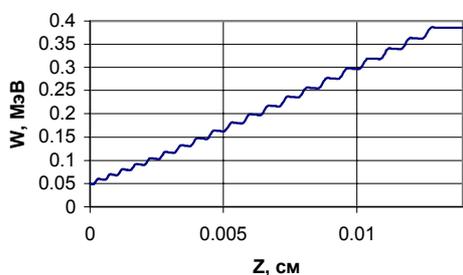
(a)



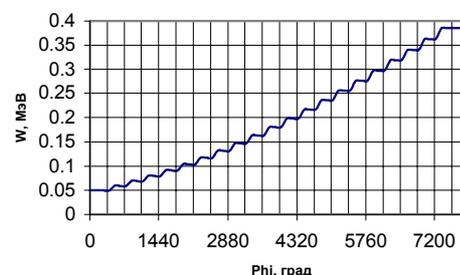
(б)

Рисунок 17. Поперечный (а) и продольный (б) фазовый портрет ядра сгустка после ускоряющей структуры.

Таким образом, в результате прохождения группирователя и ускоряющей структуры непрерывный поток частиц преобразуется в промодулированный по плотности пучок электронов с энергией 0.385 МэВ.



(a)



(б)

Рисунок 18. Зависимость энергии опорной частицы от пройденного расстояния (а) и от фазы поля в ускоряющей структуре (б).

В диапазоне  $\pm 15^\circ$  от опорной частицы, как видно из рис. 17, сосредоточивается около 50% числа всех изначальных электронов непрерывного пучка. Эта доля частиц пригодна для дальнейшего ускорения.

На рис. 18 представлены зависимости энергии опорной частицы от текущей фазы и от текущей координаты Z внутри ускоряющей структуры.

## 7. Заключение

В настоящей работе на основе численного моделирования была изучена динамика потока заряженных частиц в лазерном микроускорителе с длиной волны накачки 10  $\mu\text{м}$ . Входной непрерывный пучок электронов с энергией 0.05 МэВ на выходе из ускорителя представлял собой последовательность сгустков частиц с энергией 0.385 МэВ. Коэффициент захвата частиц ускоряющей структурой составил 50%. На базе автоэмиссионного катода был произведен расчет электронной пушки, создающей сходящийся пучок электронов со сверхмалым эмиттансом. Схема рассмотренной системы «электронная пушка - группирователь – лазерный ускоритель» показана на рис. 19.

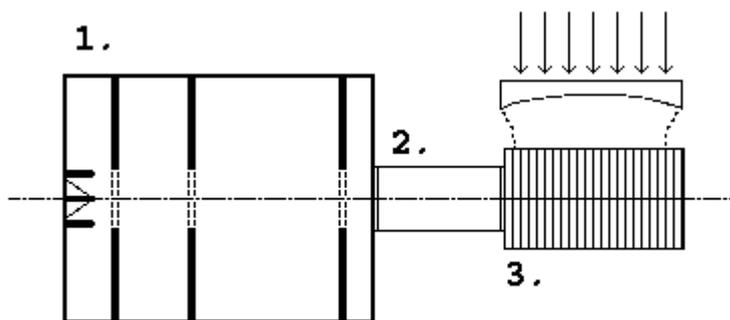


Рисунок 19. Схема установки (без соблюдения масштаба): (1) – электронная пушка, (2) – модулятор и трубка дрейфа, (3) – ускоряющая структура.

Существенное повышение (на 1-2 порядка) числа частиц в ускоряемом сгустке можно достигнуть за счёт использования многоострижных электронных эмиттеров, сверхкороткоимпульсного режима работы автокатода, либо - использования в рассмотренной схеме ускорения взрывной автоэлектронной эмиссии [10,11].

## Список литературы

1. Yu. K. Alekseev and V.I. Shvedunov, "An Open Resonator Particle Accelerator" in Proc. EPAC 2000 Conf., J.-L. Laclare, W. Mitaroff, Ch. Petit-Jean-Genaz, J. Poole, and M. Regler, ets. (World Scientific, Singapore, 2000) p. 892.
2. Yu. K. Alekseev, S.V. Abramov, A.M. Gorokhov, V.I. Shvedunov, A. Vetrov, and D.A. Zayarniy, "Electron Micro-Accelerator", proceedings of 2001 Particle Acceleration Conference, Chicago, USA, 2001, p. 4017.
3. R.L.Byer, T. Plettner, Y.C. Huang et al. "The Laser Driven Electron Accelerator Experiment At Stanford University", proceedings of 1999 Particle Acceleration Conference, New York, USA, 2001, p. 321.
4. И. Н. Сливков, «Процессы при высоком напряжении в вакууме», Москва, Энергоатомиздат, 1986, 255 с.
5. И. Н. Сливков, «Электроизоляция и разряд в вакууме», Москва, Атомиздат, 1972, 144 с.

6. Программа решения задач нестационарной теплопроводности HEAT2R, ИФВЭ, Протвино, 1984, 18 с.
7. Библиотека численного анализа НИВЦ МГУ (<http://www.srcc.msu.su>).
8. Petr Kulhanek, Particle and Field Solvers in PM models. Czech Technical University, Faculty of Electrical Engineering, Department of Physics, Technica 2, 166 27 Prague 6, Czech Republic.
9. George H. Gillespie, Thomas A. Brown, "Optics Elements For Modeling Electrostatic Lenses And Accelerator Components I. Einzel Lenses", G. H. Gillespie Associates, Inc., P.O. Box 2961, Del Mar, CA 92014, U.S.A. Center for Accelerator Mass Spectrometry, LLNL, P.O. Box 808, Livermore, CA 94551, U.S.A., p 2559.
10. A.S.Alimov, D.I.Ermakov, B.S.Ishkhanov et al, A Compact Industrial High-Current Continuous Wave Electron Linac, Proceeding of the Particle Accelerator Conference, New York, 1999, 2555
10. С.П.Бугаев и др. Взрывная эмиссия электронов. УФН, 1975, т.115, с.101.
11. Г.А.Месяц Первичные и вторичные процессы взрывной электронной эмиссии. Журнал прикладной механики и технической физики, 1980, N 5, с.138.

**Юрий Константинович Алексеев  
Алексей Михайлович Горохов  
Василий Иванович Шведунов**

**ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
В ЛИНЕЙНОМ МИКРОУСКОРИТЕЛЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002-22/706

Работа поступила в ОНТИ 16.09.2002 г.

ИД № 00545 от 06.12.1999

Издательский отдел  
Учебно-научного центра довузовского образования

117246, Москва, ул. Обручева, 55А  
119992, Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, Ж-105а  
Тел./факс (095) 718-6966, 939-3934  
e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)  
<http://www.abiturcenter.ru>

Гигиенический сертификат № 77.99.2.925.П.9139.2.00 от 24.02.2000  
Налоговые льготы – Общероссийский классификатор продукции  
ОК-005-93, том 1 – 953000

Подписано в печать 17.09.2002 г. Формат 60x90/16  
Бумага офсетная № 2. Усл. Печ. л. 1,19  
Тираж 30 экз. Заказ № 220

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО