

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



13/12-76

3620/2-76

P9 - 9818

С 345 Н

М - 345

И.М.Матора, Л.А.Меркулов

ПОВЕДЕНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПУЧКА  
В МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

**1976**

P9 - 9818

И.М.Матора, Л.А.Меркулов

· ПОВЕДЕНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПУЧКА  
В МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

В работе <sup>/1/</sup> даны теория и методика расчета, позволяющая найти такую форму меридионального сечения поверхности катода осесимметричной электронной пушки, которая обеспечивает на выходе поток, близкий к ламинарному.

Вкратце методика основана на том, что после написания точных уравнений движения электронов, в которых учитывается и объемный заряд в пучке, составляется для ЭВМ программа расчета электромагнитного поля в электронной пушке и набора траекторий электронов в ней, испущенных эмиттирующей поверхностью катода на различных радиусах. Конфигурация анода, периферийных /не эмиттирующих/ участков катода и распределение фокусирующего магнитного поля остаются неизменными в дальнейшем расчете, а форма эмиттирующей катодной поверхности вместе с начальными условиями всего набора траекторий от одной стадии расчета к другой видоизменяется в процессе счета так, чтобы происходило постепенное превращение потока электронов в ламинарный.

На каждой стадии расчета форма эмиттирующей катодной поверхности остается неизменной, а весь расчет начинается с вычисления электромагнитного поля в пушке и огибающей траектории пучка в ней. В начале всего счета задается пробная форма эмиттирующей поверхности катода. На всех стадиях поток предполагается ламинарным. Доказано, что это предположение для данного типа расчетов внутренне не противоречиво, так как после многих корректив пробной формы эмиттирующей поверхности катода в процессе перехода от одной стадии расчета к другой, которые /коррективы/ спрограммированы для автоматического выполнения ЭВМ, получается такая

окончательная форма поверхности эмиттера, которая обеспечивает ламинарность потока на выходе из пушки.

Начальная пробная огибающая, необходимая для учета объемного заряда при вычислении электромагнитного поля, на первой стадии задается произвольной, близкой к реальной. По ней ЭВМ вычисляет все необходимые данные для расчета и рассчитывает следующую /более точную/ огибающую, что приводит к пересчету заново электромагнитного поля, и эта операция повторяется до тех пор, пока последующая огибающая не совпадет с предыдущей с некоторой заданной точностью. При этом форма пробной поверхности эмиттера катода неизменна.

На всех следующих стадиях роль исходной пробной огибающей выполняет последняя /точная/ огибающая предыдущей стадии.

Точная огибающая траектория позволяет заложить в память ЭВМ тот эталонный ход всего веера начавшихся на различных радиусах эмиттера катода траекторий, который и является критерием ламинарности для дальнейшего самосогласованного расчета.

Далее происходит расчет всего веера траекторий для пробной формы эмиттера. Полученный веер оказывается грубо не ламинарным. Сравнив его с эталонным /см. выше/, ЭВМ сама вносит коррективы в форму эмиттера катода и переходит к следующей стадии расчета, которая заново включает в себя:

а/ точное вычисление новой огибающей с предшествующими расчетами электромагнитного поля уже при новой /с учетом предыдущей коррективы/ эмиттирующей поверхности катода и, следовательно, нового эталонного хода всего веера траекторий,

б/ расчет всего веера траекторий при этой новой поверхности эмиттера и

в/ вычисление корректив /с учетом нового эталонного хода веера траекторий/ в форму эмиттера для последующей стадии, если условие ламинарности не достигнуто.

Когда условие ламинарности достигнуто, т.е. рассчитанный веер траекторий совпадет с заданной точностью с эталонным ходом веера траекторий, то вполне очевидно,

но, что последняя форма эмиттирующей поверхности катода - искомая, обеспечивающая ламинарность потока. Оказывается, что при этом кривизна поверхности эмиттера изменяется немонотонно с изменением радиуса катода.

В той же работе <sup>/1/</sup> была рассчитана оптическая схема такой экспериментальной электронной пушки ЭЭП-2 на импульсное напряжение  $V = 500 \text{ кВ}$  и ток  $I = 250 \text{ А}$ , предназначенной для инжекции ламинарного пучка электронов в сооружаемый в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ линейный индукционный ускоритель ЛИУ-30/250 на энергию электронов  $30 \text{ МэВ}$  и среднюю мощность в пучке  $200 \text{ кВт}$  <sup>/2,3,4/</sup>.

На *рис. 1* слева изображена оптическая схема пушки. Эмиттирующая часть 1 поверхности катода 2 имеет диаметр  $7 \text{ см}$ . Минимальный зазор между катодом и анодом 3 равен  $5,5 \text{ см}$ . Соленоид 4 создает незранируемое магнитное фокусирующее поле  $H$ , которое для номинальных параметров пушки в максимуме /центре симметрии соленоида/ на оси равно  $350 \text{ Э}$ , а на поверхности катода в точке  $r = 3,5 \text{ см}$  равно  $11,4 \text{ Э}$ .

Пушка рассчитана в предположении, что распределение плотности эмиссии  $j_0$  с поверхности катода подчиняется известному закону "3/2". Однако после того, как искомая поверхность эмиттера была найдена, для этой формы катода был рассчитан характер потока в предположении пропорциональности плотности тока эмиссии  $j_0$  на эмиттере первой степени напряженности электрического поля. Оказалось, что ламинарность потока при этом практически не нарушается.

Справа на *рис. 1* дано распределение плотности потока  $j$  по сечению пучка при номинальных приведенных выше значениях  $I$ ,  $V$  и  $H$  на расстояниях от катода  $z = 48 \text{ см}$  /сплошная кривая/ и  $z = 36 \text{ см}$  /пунктир/ для рассчитанной в <sup>/1/</sup> геометрии пушки.

Здесь мы приводим результаты расчетов тех изменений в характере потока, которые возникают при вариации одной из трех характеристик пушки - тока, напряжения и амплитуды напряженности фокусирующего магнитного поля при номинальных значениях всех остальных величин.

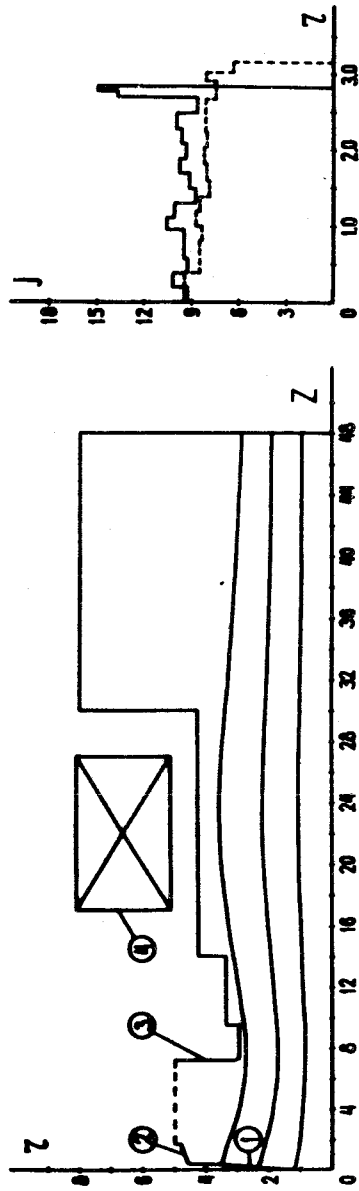


Рис. 1. Электронно-оптическая система экспериментальной электронной пучки ЭЭП-2/слева/ и плотность тока по сечению /справа/ на ее выходе при номинальных  $I, V, H$ . /сплошная кривая - в точке  $z = 48$  см; пунктирная - в точке  $z = 36$  см;  $I = 250$  А;  $V = 500$  кВ;  $H = 350$  Э;  $r$  и  $z$  в см;  $j$  в  $A/cm^2$ . 1 - эмиттер; 2 - катод; 3 - анод; 4 - фокусирующий электрод

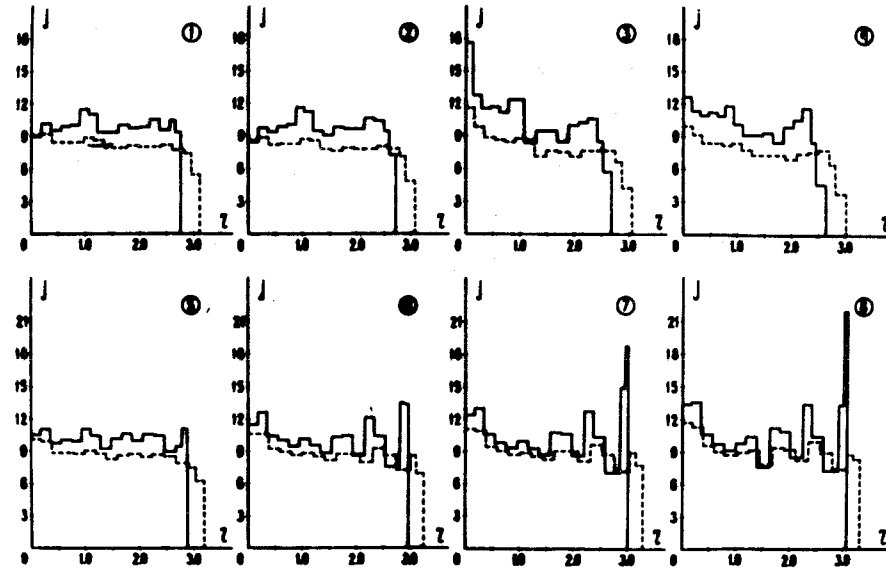


Рис. 2. Плотность тока на выходе из ЭЭП-2 при изменении  $I$ . /сплошная кривая - в точке  $z = 48$  см; пунктирная - в точке  $z = 36$  см;  $V = 500$  кВ;  $H = 350$  Э;  $r$  в см;  $j$  в  $A/cm^2$ . 1.  $I = 237,5$  А; 2.  $I = 225$  А, 3.  $I = 212,5$  А, 4.  $I = 200$  А, 5.  $I = 262,5$  А, 6.  $I = 275$  А, 7.  $I = 287,5$  А, 8.  $I = 300$  А.

Уместно напомнить <sup>/1/</sup>, что наша методика расчета основана на использовании предположения о равномерности потока по сечению пучка при заданных  $z$  в глубине потока. В нашем случае это предположение вступает в силу с точки  $z = 14$  см, после которой скорости всех электронов практически одинаковы. Вследствие этого приводимые результаты расчетов на рис. 2-4 следует считать приближенными, причем отклонения их от истинных возрастают с ростом расчетной неравноплотности пучка. Тем не менее, в исследованных нами нижеприведенных условиях расчеты дают удовлетворительную однородность /поперек пучка/ плотности потока вплоть

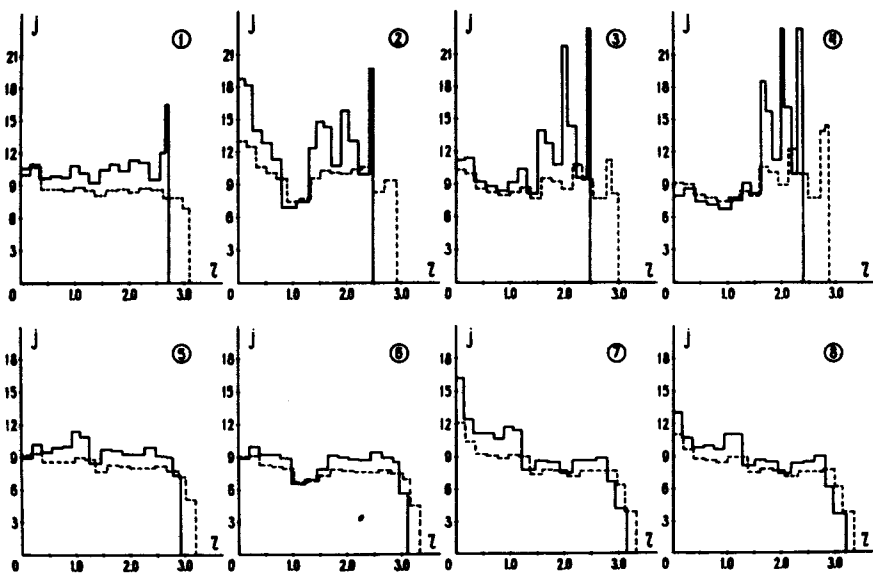


Рис. 3. Плотность тока на выходе из ЭЭП-2 при изменении  $V$ . /сплошная кривая - в точке  $z = 48$  см; пунктирная - в точке  $z = 36$  см;  $I = 250$  А,  $N = 350$  Э;  $r$  в см;  $j$  в  $A/cm^2$ /. 1.  $V = 475$  кВ, 2.  $V = 450$  кВ; 3.  $V = 425$  кВ, 4.  $V = 400$  кВ, 5.  $V = 525$  кВ, 6.  $V = 550$  кВ, 7.  $V = 575$  кВ, 8.  $V = 600$  кВ.

до расстояния от катода  $z = 36$  см, что свидетельствует о том, что расчетные траектории и при этих отличных от номинальных условиях близки к реальным, и, следовательно, данные рис. 2-4 заслуживают доверия.

Все вышесказанное о результатах расчетов тех изменений в характере потока, которые возникают при вариации одной из трех характеристик пушки, относится и к рис. 5, на котором изображены характеристики потока при одновременном изменении двух величин -  $I$  и  $V$ , связанных законом "3/2", хотя известен случай, когда наблюдалась и линейная зависимость между ними<sup>1/3</sup>.

На рис. 2-5 сплошной кривой дано распределение плотности потока по сечению пучка для  $z = 48$  см и пунктиром - для  $z = 36$  см.

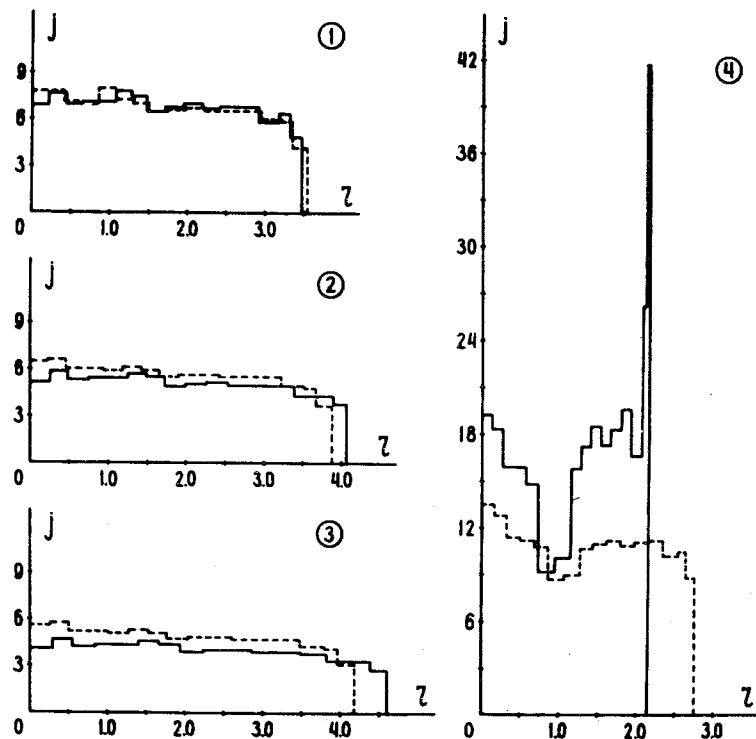


Рис. 4. Плотность тока на выходе из ЭЭП-2 при изменении  $N$ . /сплошная кривая - в точке  $z = 48$  см; пунктирная - в точке  $z = 36$  см;  $I = 250$  А;  $V = 500$  кВ;  $r$  в см;  $j$  в  $A/cm^2$  /; 1.  $N = 315$  Э, 2.  $N = 280$  Э,  $N = 245$  Э, 4.  $N = 385$  Э.

Были также рассчитаны изменения в характере потока, возникающие при введении возмущения номинального контура меридионального сечения поверхности эмиттера катода. На рис. 6/а/ показано введенное возмущение этого контура  $\delta z(r)$ . Номинальный контур условно совпадает с осью  $r / \delta z$  и  $r$  в см/. Изображенные на рис. 6/б/ распределения плотности потока /в  $A/cm^2$ / для случая возмущенной поверхности эмиттера /пунктир/ и для номинальной /сплошная кривая/, взятые на расстоянии  $z = 36$  см. от катода, иллюстрируют резкую

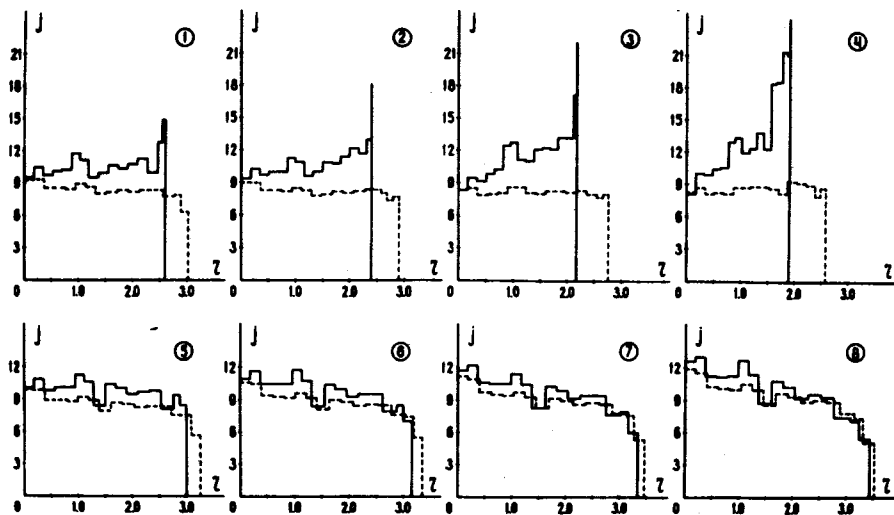


Рис. 5. Плотность тока на выходе из ЭЭП-2 при изменении  $V$  и  $I$  по закону "3/2". /сплошная кривая - в точке  $z = 48$  см; пунктирная - в точке  $z = 36$  см;  $H = 350$  Э;  $r$  в см;  $j$  в  $A/cm^2$  /.

1.  $V = 475$  кВ;  $I = 231,49$  А;
2.  $V = 450$  кВ;  $I = 213,46$  А;
3.  $V = 425$  кВ;  $I = 195,92$  А;
4.  $V = 400$  кВ;  $I = 178,88$  А;
5.  $V = 525$  кВ;  $I = 268,98$  А;
6.  $V = 550$  кВ;  $I = 288,45$  А;
7.  $V = 575$  кВ;  $I = 308,31$  А;
8.  $V = 600$  кВ;  $I = 328,65$  А.

зависимость характера потока от возмущений поверхности эмиттера катода.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что электронный пучок в аксиальной электронно-оптической системе, рассчитанной согласно методике <sup>[1]</sup> достаточно хорошо сохраняет свою ламинарность в довольно широком  $\pm 20\%$  диапазоне изменений ее электрических параметров. Что же касается изменений поверхности эмиттера, то здесь имеет место резкое нарушение характера потока даже при малых  $\sim 0,04$  см при диаметре катода 7 см / отклонениях его контура от номинального.

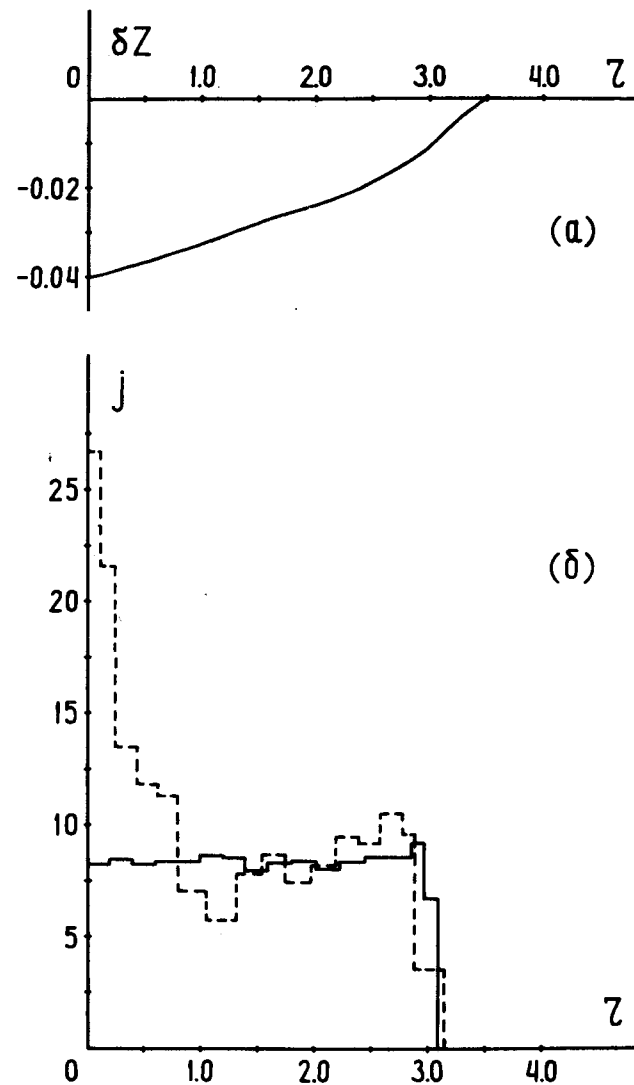


Рис. 6

### *Литература*

1. *И.М. Маторы, Л.А. Меркулов. ОИЯИ, Р9-9476, Дубна, 1976.*
2. *В.Д. Ананьев и др. ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.*
3. *П.С. Анцупов и др. НИИЭФА, А-0213, Ленинград, 1974.*
4. *П.С. Анцупов и др. Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц /Москва, 18-20 ноября 1974 г./, 1, стр. 298-301, М., Наука, 1975.*

*Рукопись поступила в издательский отдел  
25 мая 1976 года.*