

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ БЕТАТРОНА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

Б. Н. ГУЛЬКО

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Известно, что одним из важных вопросов, связанных с усовершенствованием бетатрона, является вопрос о разработке методов увеличения интенсивности электронного пучка. В связи с этим большое внимание уделяется фокусировке электронов, движущихся в ускорительной камере, увеличению максимальной входной энергии электронов, приводящему к удлинению рабочего интервала впуска. Вместе с тем, частичного увеличения интенсивности пучка электронов можно добиться также за счет усовершенствования старых и создания новых конструкций электронных пушек, дающих строго параллельный или слабо расходящийся пучок электронов.

Электронная пушка бетатрона до сих пор является сравнительно малоисследованным его элементом. Существующая конструкция электронной пушки впервые была предложена Керстом для его бетатрона на 20 Мэв [1]. За 14 лет, прошедших с тех пор, существенных изменений в ее конструкцию не было внесено. Лишь только в последние годы в иностранной печати было опубликовано несколько работ [2,3], посвященных исследованию такой пушки. Следует отметить, что в указанных работах не намечается путей для конструктивного изменения и улучшения ее работы.

Электронная пушка для создания ленточного пучка электронов, используемого в бетатроне, является трехэлектродной системой и представляет собою цилиндрический иммерсионный объектив. Конструкция пушки довольно проста. Она выполнена в виде коробочки, согнутой из танталовой жести, служащей анодом. Внутри располагается управляющий электрод, имеющий корытообразную форму. В последнем помещена спираль, навитая из тонкой вольфрамовой проволоки, которая и является катодом пушки. В аноде, против катода, прорезана узкая щель, сквозь которую выходят электроны, покидающие пушку. На тыльной стороне анода крепится тонкая вольфрамовая пластинка, служащая мишенью. Такая пушка дает поток электронов, летящих в одном направлении. На рис. 1 схематически показано ее устройство.

Как известно [4], трехэлектродная электронно-оптическая система дает возможность электрически управлять электронным пучком, т. е. фокусное расстояние ее является функцией отношения сеточного потенциала к потенциалу анода, но часто, ради упрощения схемы

инжекции, управляющий электрод (сетку) и катод соединяют вместе и на них подается одинаковый потенциал. Подобное упрощение приводит к тому, что возможность фокусировки электронного пучка за счет изменения потенциала управляющего электрода утрачивается. Трехэлектродная электронно-оптическая система превращается, таким образом, в двухэлектродную. В такой двухэлектродной системе менять фокусировку пучка можно только лишь за счет изменения положения катода внутри управляющего электрода. Однако, на самом деле, и эта возможность не может быть использована, так как катод при сборке пушки фиксируется в каком-то определенном положении. Важно поэтому знать, на каком расстоянии от анодной щели следует устанавливать катод, чтобы получить либо параллельный, либо слаборасходящийся поток электронов.

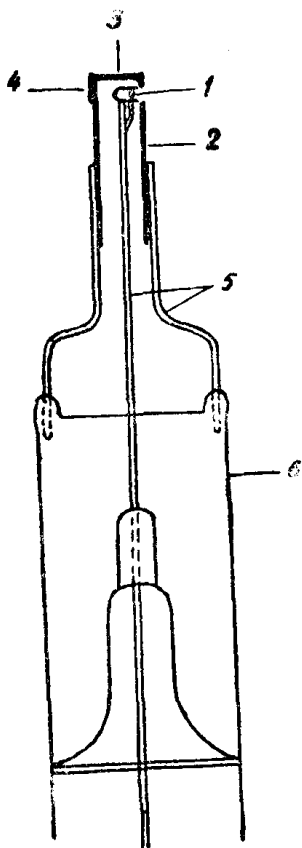


Рис. 1

Отклонение катода от этого оптимального положения в ту или иную сторону вдоль оси приводит к тому, что из анодной щели электроны вылетают расходящимся веерообразным пучком. Последнее не является желательным, так как внутри ускорительной камеры оказывается большое количество электронов, не участвующих в процессе ускорения и засоряющих камеру бетатрона.

Общие закономерности геометрической электронной оптики позволяют определить приближенное фокусное расстояние такой электронной пушки, если известно распределение потенциала вдоль ее оси.

На рис. 2 схематически изображено распределение потенциала в такой системе. Иммерсионный электронный объектив состоит, таким образом, из цилиндрической иммерсионной линзы и круглого катода, находящегося в поле линзы.

Цилиндрическая иммерсионная линза образуется в зазоре между управляющим электродом и щелевой диафрагмой в аноде. Согласно методу эквивалентных тонких линз, можно рассматривать иммерсионную линзу как систему, состоящую из двух тонких линз.

Поле линзы слева от средней плоскости MN , т. е. в области управляющего электрода, производит на электронные лучи собирающее действие (собирающая тонкая линза), в то время как поле справа от средней плоскости, в области анодной диафрагмы, рассеивает электронные лучи (рассеивающая тонкая линза). Рассеивающее действие всегда меньше собирающего действия первой линзы, так как скорость электронов во второй области поля всегда больше.

Чтобы оценить действие этих частей поля, оценим их оптические силы. Оптическая сила иммерсионного объектива равна сумме оптических сил сеточной и анодной диафрагм. Для вычисления последних можно воспользоваться выражением для оптической силы тонкой цилиндрической линзы [5]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{2\sqrt{\varphi_0}} \int_a^b \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \frac{d^2\varphi}{dz^2} \cdot dz, \quad (1)$$

где φ_0 — потенциал справа и слева от линзы. Это выражение дает для оптической силы сеточной линзы

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{2\varphi_c} \int_a^b \frac{d}{dz} \left(\frac{d\varphi}{dz} \right) dz, \quad (2)$$

где φ_c — потенциал на оси в плоскости сеточной диафрагмы.

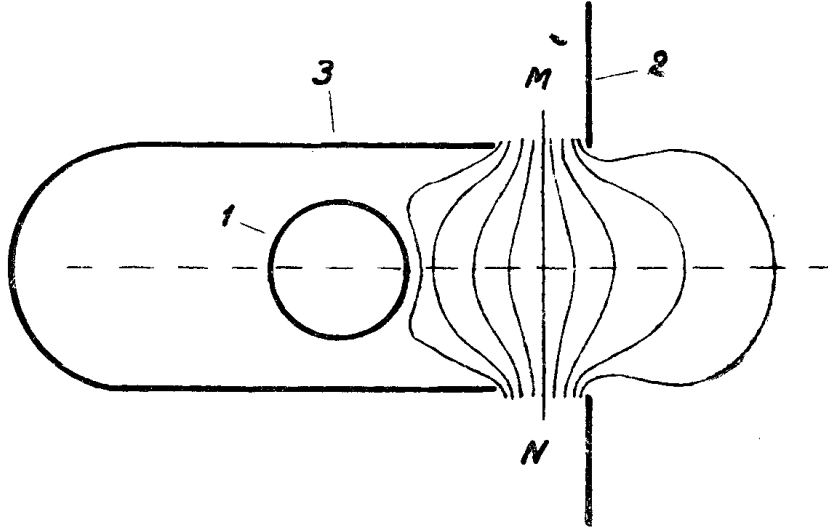


Рис. 2

Интегрируя (2), получим

$$\frac{1}{f_c} = \frac{\left(\frac{d\varphi}{dz} \right)_2 - \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)_1}{2\varphi_c} = \frac{E_1 - E_2}{2\varphi_c}, \quad (3)$$

где E_1 и E_2 — напряженности поля слева и справа от плоскости диафрагмы.

Аналогично оптическая сила анодной диафрагмы

$$\frac{1}{f_a} = - \frac{\left(\frac{d\varphi}{dz} \right)_2}{2\varphi_a} = - \frac{E_2}{2\varphi_a}, \quad (4)$$

где E_2 — напряженность поля слева от анодной диафрагмы (она всегда отрицательна),

φ_a — потенциал на оси в плоскости анодной диафрагмы. Напряженность поля справа от анодной диафрагмы считаем равной нулю.

Складывая оптические силы сеточной и анодной диафрагм, мы получаем оптическую силу иммерсионного объектива

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_c} + \frac{1}{f_a} = \frac{E_1 - E_2}{2\varphi_c} - \frac{E_2}{2\varphi_a}. \quad (5)$$

Отсюда находим приближенную формулу для фокусного расстояния системы

$$f = \frac{2\varphi_c\varphi_a}{E_1\varphi_a - E_2(\varphi_c + \varphi_a)} \quad (6)$$

Методика исследования

Влияние глубины погружения вольфрамового катода внутрь управляющего электрода на „фокусировку“ электронных лучей исследовалось с помощью электролитической ванны.

Метод электролитической ванны достаточно полно описан в специальной литературе [6] и дает возможность снять картину поля с большой точностью [7].

В работе использовалась модель электродов, изготовленная из белой жести, увеличенная в 100 раз по сравнению с оригиналом. Электролитическая ванна была сделана из текстолита толщиной 0,5 см, ее размеры $90 \times 77 \times 32$ см. Зонд из платиновой проволоки толщиной 0,2 мм укреплялся на одном плече пантографа. На другом плече его имелась специальная обойма, в которую вставлялся карандаш, позволяющий делать необходимые отметки. В качестве электролита использовалась обычная водопроводная вода. Напряжение частотой в 50 гц подавалось на электроды с помощью лабораторного автотрансформатора. Потенциал зонда менялся с помощью потенциометра, состоящего из двух магазинов сопротивлений по 10 тысяч ом каждый.

Зонд погружался в электролит на глубину 0,5 — 1,0 мм. В качестве индикатора нулевого тока на зонд использовался осциллограф ЭО-4. За меру глубины погружения катода бралось расстояние от переднего края катода (обращенного к аноду) до края управляющего электрода.

Построение электронных траекторий производилось по методу радиусов кривизны [5].

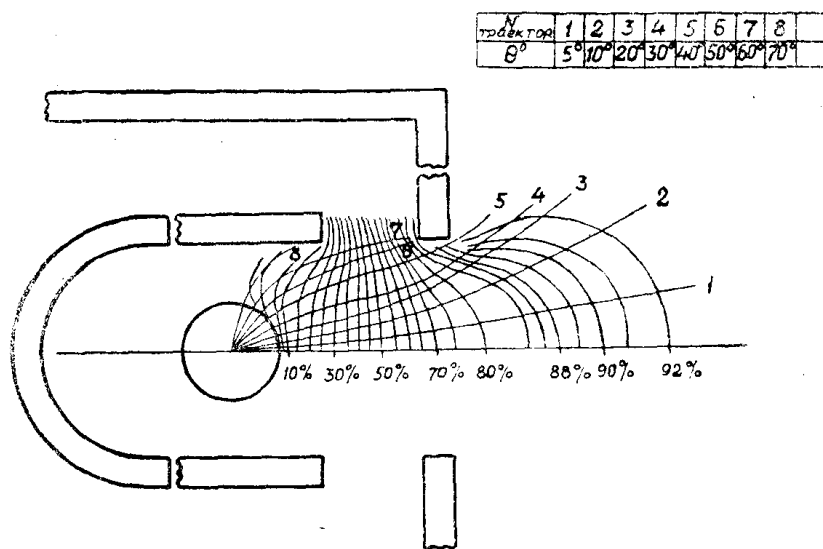


Рис. 3

Результаты исследования и их обсуждение

Исследовались распределения потенциалов в зазоре между управляющим электродом и анодом для трех положений катода внутри управляющего электрода. Распределение эквипотенциальных линий для глубин погружения в 0,25 мм, 1,00 мм и 1,75 мм представлено

на рис. 3,4 и 5. В средней области поля потенциалы эквипотенциальных линий отличаются на 5 % от потенциалов соседних линий.

Вблизи катода и за анодом поле снималось с большей точностью. Глубина погружения катода в 0,25 мм соответствует обычному по-

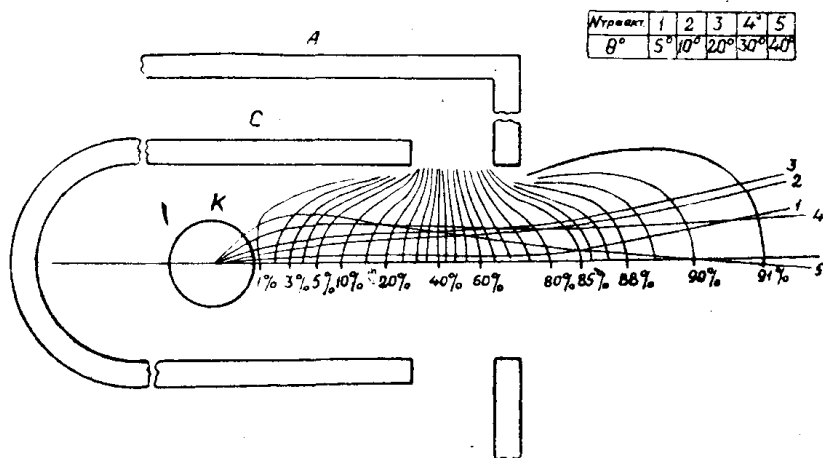


Рис. 4

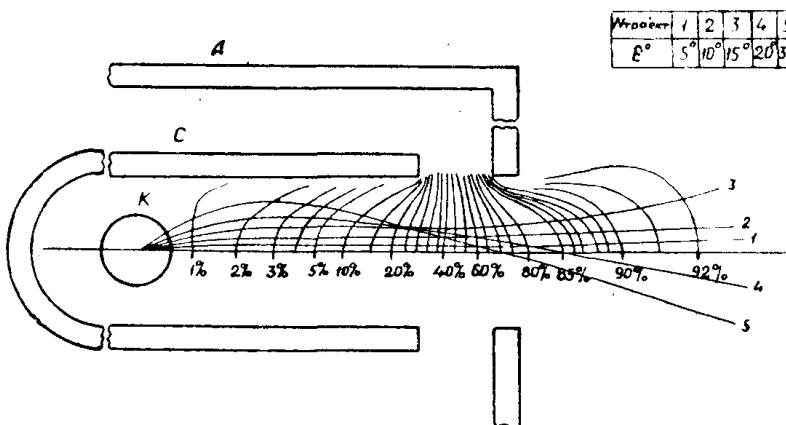


Рис. 5

ложению катода в электронной пушке. Как можно видеть на рис. 3, при таком положении катода электронная пушка дает сильно расходящийся поток электронов. Из сравнения рисунков следует, что с увеличением глубины погружения катода внутрь управляющего электрода уменьшается ширина электронного пучка за счет более интенсивного отклонения электронов к оси системы.

При некоторой глубине погружения становится заметным эффект „перифокусировки“ электронов, когда электронные лучи, пересекая ось системы, опять образуют расходящийся пучок.

Найденные картины электростатических полей позволяют установить некоторые пределы для глубины погружения катода, когда можно ожидать, что выходящий из пушки электронный пучок будет иметь минимальные размеры. На рис. 3, 4 и 5 представлены электронные траектории для электронов, вылетающих из катода под различными углами θ .

Считаем в первом приближении, что электроны, покидающие последнюю эквипотенциаль, выходящую за пределы анода, дальше двинутся прямолинейно. Для нескольких электронных траекторий со

значениями θ от 5° до 30° были измерены углы φ , образуемые продолженными назад прямыми линиями с осью системы. Значения этих углов для четырех траекторий с одним и тем же θ при различных глубинах погружения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значение углов φ при различных углах вылета электронов θ и различных глубинах погружения катода

| $\theta^\circ \backslash$ мм х | 5° | 10° | 20° | 30° |
|-----------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------|
| 0,25 | 9° | $24,5^\circ$ | $37,5^\circ$ | 42° |
| 1,00 | 7° | 7° | $12,5^\circ$ | 0° |
| 1,75 | 5° | 3° | -11° | $-18,5^\circ$ |

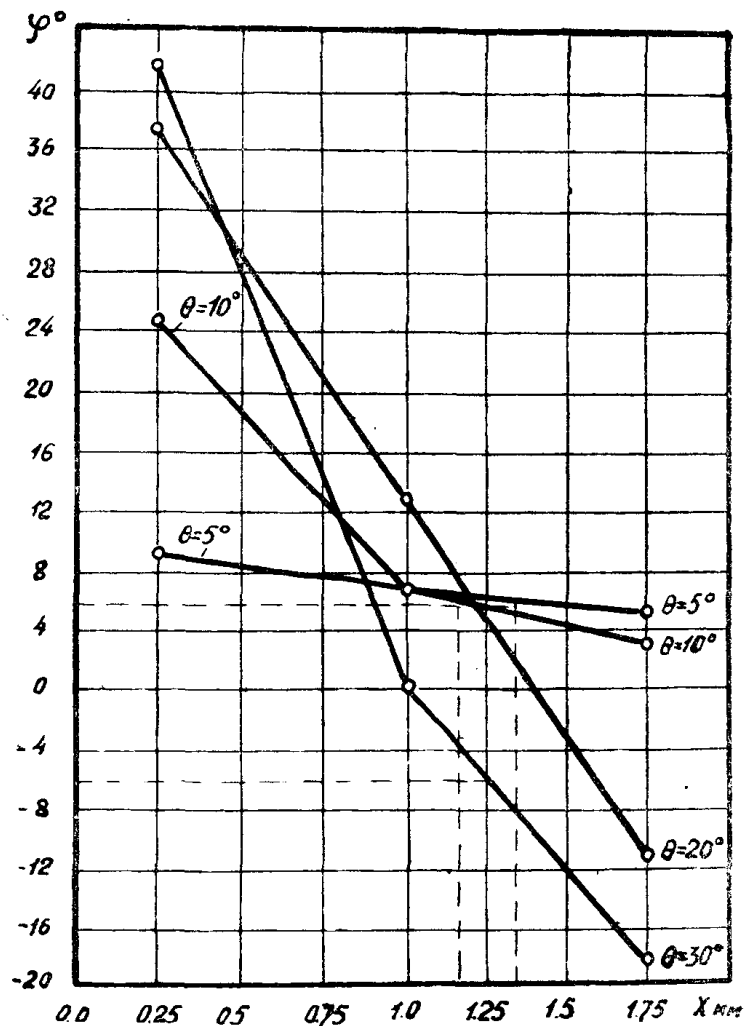


Рис. 6

На рис. 6 представлена графическая зависимость этих углов для различных Θ от глубины погружения катода x . Если принять, что углы φ для всех траекторий не должны превышать 6° , то из графика находим, что глубина погружения катода при растворе электронного пучка в 12° должна лежать в пределах от 1,2 до 1,3 мм.

Нами здесь принят минимальный раствор электронного пучка, так как эффект „перефокусировки“ не дает возможности получить пучок с одинаковым сечением по его длине. Не учитываемый нами пространственный заряд должен еще несколько увеличить размеры пучка. Аналогичные же исследования электронной пушки бетатрона были предприняты Алленом [3] с помощью резиновой мембраны. Им было установлено, что минимальная полуширина электронного пятна имеет место при глубине погружения катода в 0,71 мм. Эти результаты также подтверждают наличие зависимости между размерами электронного пучка и глубиной погружения катода.

Различие между результатами Аллена и нашими можно объяснить тем, что в его экспериментах использовалась пушка других размеров.

На основании полученных нами результатов можно рекомендовать увеличить глубину погружения катода в электронной пушке бетатрона и брать ее равной 1,2 — 1,3 мм, а не 0,25 мм, как обычно. Улучшение работы бетатрона при рекомендованной глубине погружения также подтверждает эти выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. W. Kerst. A 20. Million Electron-Volt Betatron or Induction Accelerator, Rev. Sei. Instr., vol. 13, 1942
2. M. M. Zipsicas. The Electrostatic Field of an Electron Gun for a 20 Mev Betatron, Metropolitan. Vickers Research Report № 10522, 1953.
3. Use K. P. Allen. of Rubber Sheet Model for Investigation of Electron Frajectories, Electron Engeneering vol. 27, 1955.
4. Вайнриб Е., Милютин В. Электронная оптика, Госэнергоиздат. 1951.
5. Рустерхольц А. Электронная оптика, Изд. иностранной литературы. 1952.
6. Лукошков В. В. Электролитический метод изучения электростатических полей. Известия электропром. слабого тока № 10, 1939.