

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИНЖЕКТОРОВ БЕТАТРОНА

Н. М. ГОЛОЩАПОВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Конструкция, электронно-оптические, эмиссионные и др. свойства инжектора в какой-то мере определяют величину выхода излучения бетатрона. Однако, если судить по периодической литературе, вопросу исследования свойств инжекторов и совершенствованию их конструкции уделялось мало внимания. В литературе [1, 2, 3] упоминается о новых инжекторах, но, насколько нам известно, эти инжекторы, видимо, не получили широкого применения и развития, так как в большинстве случаев все-таки используется обычный инжектор керстовского типа. А сведений об исследовании свойств инжекторов почти нет совсем.

При исследовании свойств инжекторов и совершенствовании их геометрии необходимо исходить из требований, предъявляемых к ним:

1. Срок службы катода инжектора должен быть во всяком случае не меньше срока службы проводящего слоя камеры и самой камеры. Это особенно важно для отпаянной камеры бетатрона. В настоящее время, в большинстве случаев, долговечность катода весьма небольшая.

2. Пучок электронов из инжектора должен выходить параллельным или близким к параллельному, так как амплитуда колебаний будет наименьшей у тех электронов, которые инжектируются по касательной к орбите инжектора, и условия захвата в ускорение этих электронов будут наилучшими в сравнении с другими электронами, вылетающими под углом к этой касательной.

3. Инжектор должен быть простым по конструкции и доступным для изготовления и ремонта в условиях любой лаборатории.

4. Инжектор должен давать достаточную эмиссию и иметь высокую электрическую прочность.

Мы использовали метод сравнения, т. е. различные варианты инжекторов исследовали в одинаковых условиях, так как расчеты, основанные на оптике одного электрона, положительных результатов не дают. Исследование проводилось в электролитической ванне обычного типа на экспериментальной установке, позволяющей наблюдать движение пучка на первом обороте в бетатроне и на электронно-оптической скамье.

Для керстовского типа инжектора, применяемого во всех бетатронах лабораторий факультета, электрическое поле, снятое в электролитической ванне, представлено на рис. 1. Угол расхождения траекторий электронов получается $\varphi \approx 40 \div 45^\circ$. Результирующее действие такой оптической системы — резкое дефокусирование пучка.

Часть поверхности катода, участвующая в создании пучка из инжектора, оказывается весьма небольшой (угол $\gamma \approx 20^\circ$). Такие инжекторы

ввиду их плохой оптики и малой полезной поверхности катода работают в режиме перегрузки и потому недолговечны.

После опробования нескольких вариантов других инжекторов мы остановили свой выбор на длиннофокусном инжекторе, применяемом в электронных микроскопах [4]. Такой инжектор был изготовлен и исследовано его электрическое поле (рис. 1). Из рисунка видно, что угол расхождения траекторий здесь $\varphi \approx 15 \div 20^\circ$, пучок сфокусирован значительно лучше, а полезная поверхность катода примерно раз в 8—9 больше, чем у старого инжектора. Таким образом, для создания необходимой начальной плотности заряда пучка, этот инжектор может работать в значительно более легких условиях по накалу, чем старый, т. е. можно увеличить его долговечность.

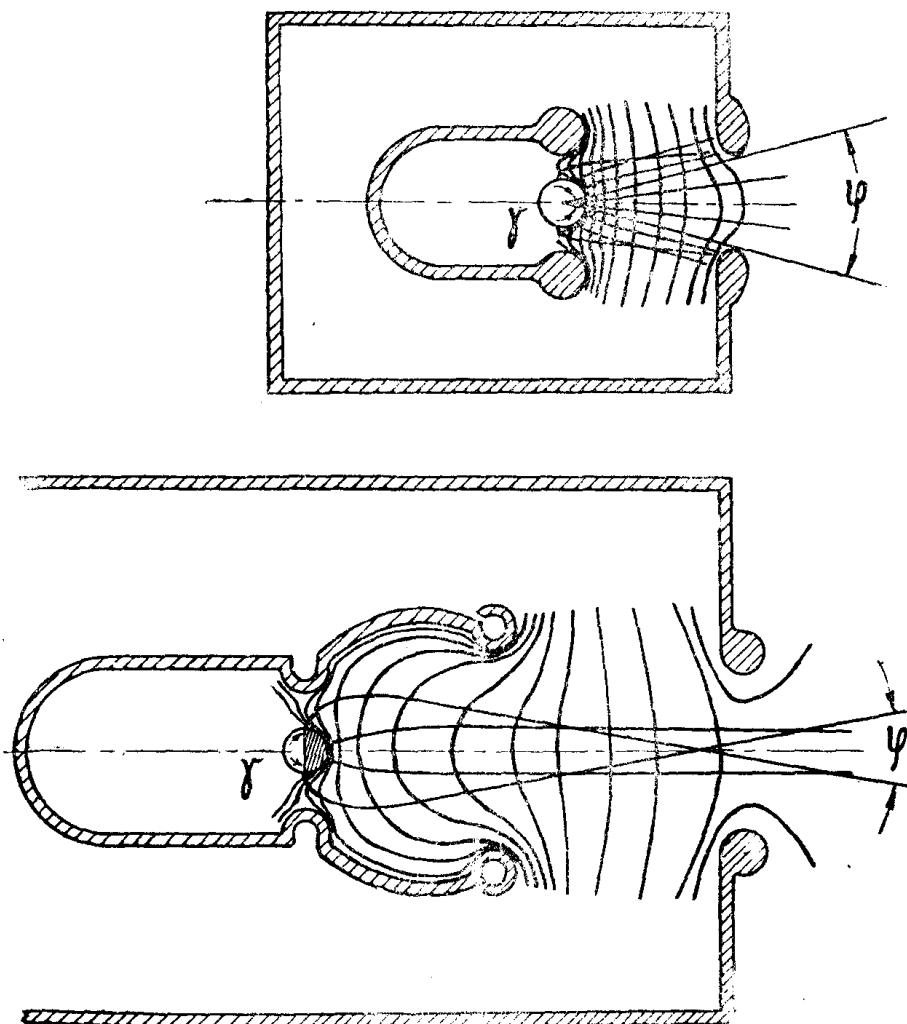


Рис. 1. Электрическое поле и траектории электронов для бетатронных инжекторов. Верхний—инжектор Керста. Нижний—выбранный инжектор.

Так как электролитическая ванна не дает нам представления о форме пучка, выходящего из инжектора, мы исследовали инжекторы на экспериментальной установке наблюдения первого оборота. Схема этой установки дана на рис. 2. Магнитное поле, подобное управляющему полю бетатрона на 15 Мэв, создается намагничивающими катушками и сплошными профилированными сердечниками-полюсами. Кривые потенциальной функции (для плоскости $z = 0$ и $R_0 = 12,75$ см) и n показаны на рис. 4. Использовалась известная методика построения потенциальной функции [5]. Видим,

что фокусирующие свойства магнитного поля установки даже лучше, чем у действующих бетатронов. Камера имеет кроме инжекторного и откачного еще шесть тубусов (рис. 3), в которые поочередно ставится приемник тока в виде системы фарадеевых цилиндров по всему сечению камеры. Перед фарадеевыми цилиндрами располагается латунный экран с отверстиями против латунных цилиндров, которые укреплены в плексигласовой пластине.

Измеряя ток с каждого цилиндра, мы, таким образом, можем определить распределение плотности тока пучка по сечению камеры. Такая методика исследования значительно приближает нас к действительным условиям, имеющим место в бетатроне, а форма пучка получается такой, как на первом обороте.

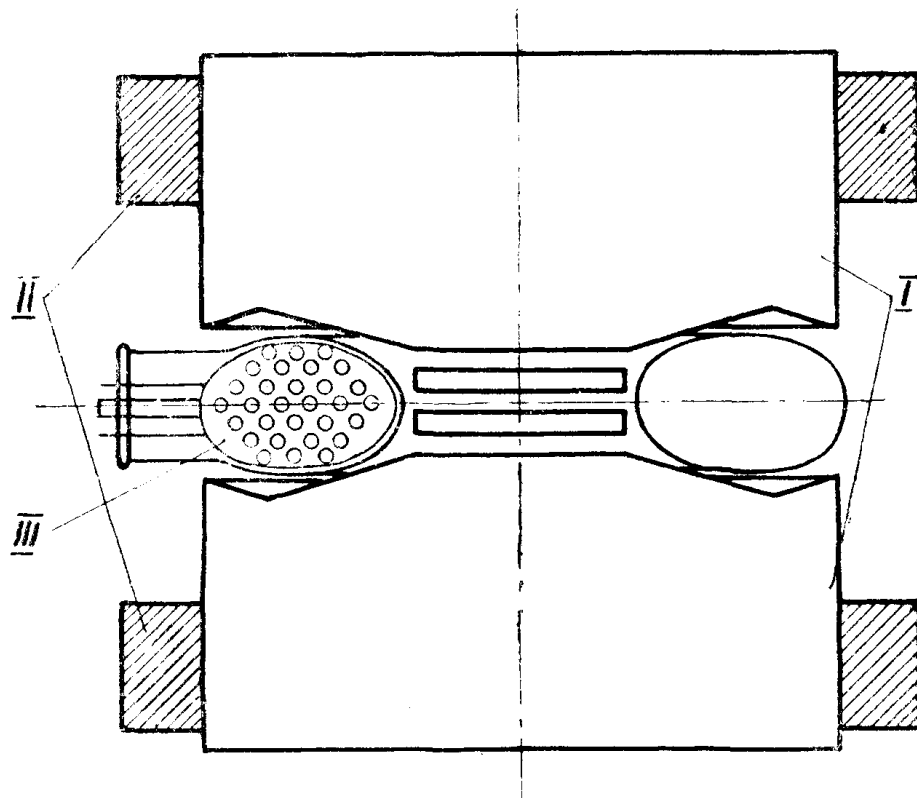


Рис. 2. Схема электромагнита экспериментальной установки для наблюдения пучка электронов на первом обороте. I—профилированные сердечники-полюса, II — намагничивающие катушки, III — приёмник тока.

За время одного, например, первого оборота магнитное поле можно практически считать постоянным, скорость электрона также постоянной (у бетатрона на 15 Мэв с $U_i = 30 \div 40$ кВ энергия, приобретаемая электронами за первый оборот, составляет около 0,0005 от начальной энергии). Поэтому электромагнит установки мы питаем постоянным током, а на инжектор подаем постоянное напряжение. Это значительно облегчает измерение распределения плотности пучка по сечению.

Результаты измерений тока, пересчитанные на плотность тока, показаны на рис. 5 ($U_i = 2000$ в, $U_n = 2,84$ в). Дано изменение плотности тока по его сечению, спроектированное на ось сечения камеры¹⁾. Катоды инжекторов одинаковы.

¹⁾ Пучки оказались вне плоскости $z = 0$, по сечению в виде эллипсов. Проектируется большая ось сечения пучка.

Оказалось, что общий ток пучка для нового инжектора раза в 3,5—4 больше, чем для старого инжектора ¹⁾. Не трудно видеть, что для старого инжектора вообще не имеет смысла говорить о пучке. Скорее это электронное облако в объеме камеры, в то время как новый инжектор дает четко выраженный пучок, существующий в течение всего первого оборота (до 7 тубуса). Правда, плотность тока его значительно уменьшается к концу оборота, но пучок сохраняется.

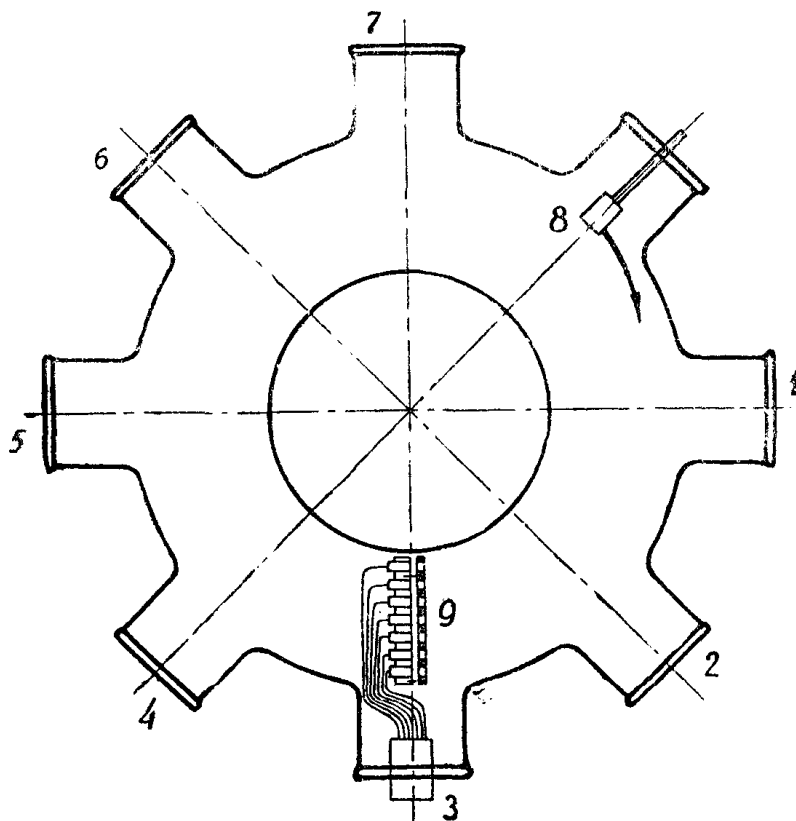


Рис. 3. Используемая в эксперименте камера. 1—7 тубусы, 8—инжектор, 9—приёмник тока.

Наконец, мы наблюдали расхождение электронного пучка от исследуемых инжекторов на электронно-оптической скамье: пучок падает на флуоресцирующий экран, и по размерам светящегося пятна на разных расстояниях от инжектора можно определить угол расхождения пучка. Результаты (рис. 6) также оказались в пользу выбранного инжектора. В этих экспериментах угол расхождения пучка больше на 30—35% угла, который получился в электролитической ванне. Ясно, что такое различие обусловлено, в первую очередь, электростатическим взаимодействием электронов в пучке, а величина этого различия остается примерно такой же и при других вариантах геометрии инжектора.

При исследовании влияния потенциала фокусирующего электрода на расхождение пучка оказалось, что при подаче отрицательного потенциала относительно катода на фокусирующий электрод до 1% от U_i угол расхождения пучка уменьшается примерно в два раза. Общий ток эмиссии также несколько уменьшается. При дальнейшем увеличении отрицательного потенциала на фокусирующем электроде инжектор запирается почти полностью. При подаче положительного потенциала на фокусирующий

¹⁾ Ток с анодов инжекторов не измерялся.

электрод угол расхождения пучка увеличивается и значительно возрастает общий ток эмиссии с катода.

Применение импульсного питания инжектора к существенным изменениям расхождения пучка не приводит, за исключением того, что границы светящегося пятна становятся размытыми, нерезкими и форма пятна (т. е. сечение пучка) несколько изменяется. Эти явления, видимо, обусловлены присутствием в пучке электронов различных скоростей.

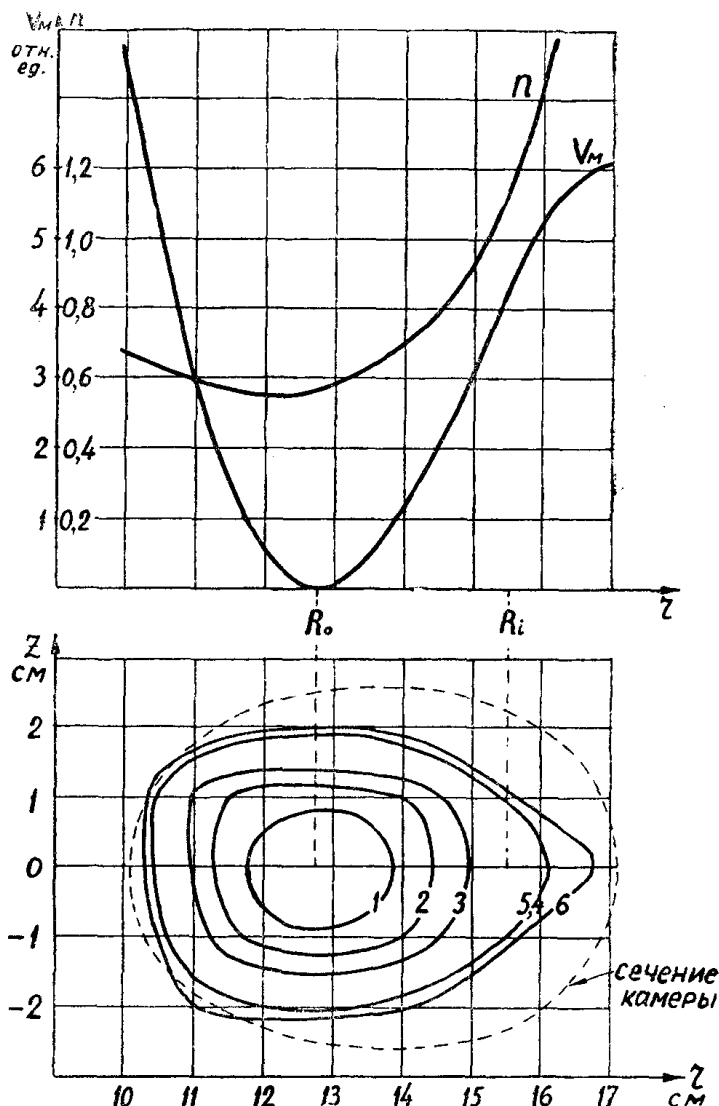


Рис. 4. Характеристики управляющего магнитного поля электромагнита экспериментальной установки.

Сверху — кривые потенциальной функции V_m и n для $z=0$, внизу — эквипотенциальные кривые потенциальной функции по сечению камеры.

Наконец, в экспериментах обнаружено следующее. Для инжектора керстового типа наибольший электронный ток с катода на анод будет от катода на края анодного отверстия. Вследствие бомбардировки электронами анода здесь возникает обратный ионный ток [6], который весьма сильно уменьшает электрическую прочность этого промежутка. Пробой в первую очередь в большинстве случаев происходит именно здесь. Избежать этого ионного тока в конструкции керстового инжектора невозможно. В выбранном инжекторе такой ионный ток имеет место с катода в вер-

тикальном направлении, т. е. по оси катода вверх и вниз. На края анодного отверстия тока нет, что обусловлено формой фокусирующего электрода. В данном случае устранить ионный ток можно постановкой заслонок или выполнением фокусирующего электрода в виде особой коробочки. Инжектор с таким фокусирующим электродом-коробочкой нами был опробован и дал хорошие результаты. Можно также заметить, что ионные токи приводят не только к уменьшению электрической прочности, но и к быстрому разрушению катода из-за бомбардировки его ионами.

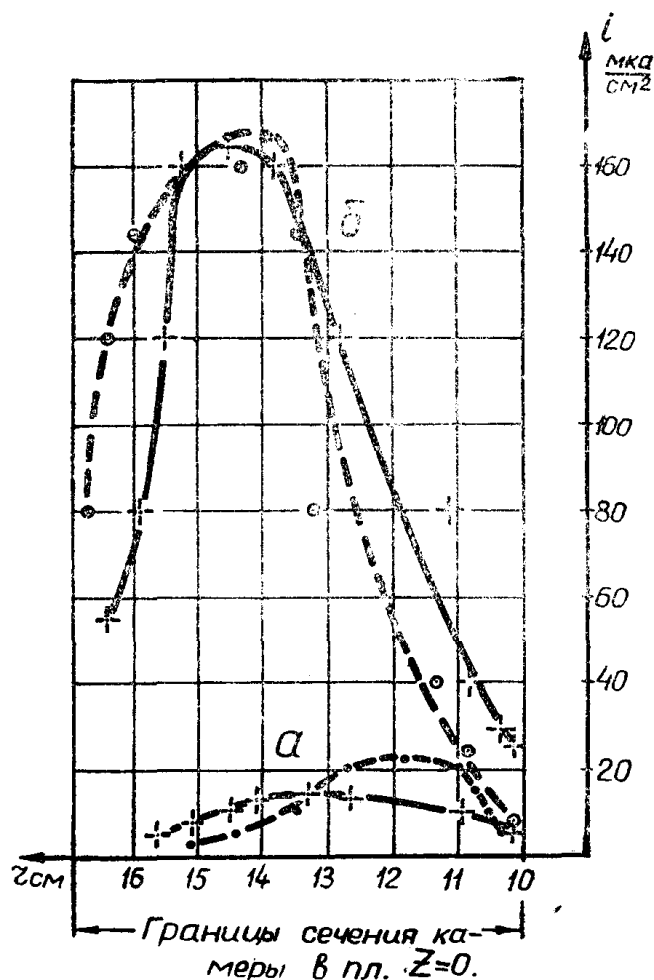


Рис. 5. Изменение плотности тока пучка по сечению пучка. *a* — пучки из инжектора керстовского типа, *b* — пучки из инжектора новой конструкции, пунктир — приёмник тока в третьем тубусе, сплошная линия — приёмник тока в пятом тубусе.

Из электронной оптики известно, что уравнения движения электрона, движущегося под действием аксиально-симметричного поля E , имеют вид [4]

$$\ddot{z} = -\frac{e}{m} \frac{\partial V}{\partial z},$$

$$\ddot{r} = -\frac{e}{m} \frac{\partial V}{\partial r}.$$

А уравнение луча записывается [7]

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{V_0'(z)}{2V_0(z)} \frac{dr}{dz} + \frac{V_0''(z)}{4V_0(z)} r = 0.$$

Это основные уравнения электронной оптики, позволяющие определить главные точки и плоскости электрической линзы и траектории электронов в ней.

Чтобы найти решение этих уравнений, надо знать зависимость электрического потенциала V от координат.

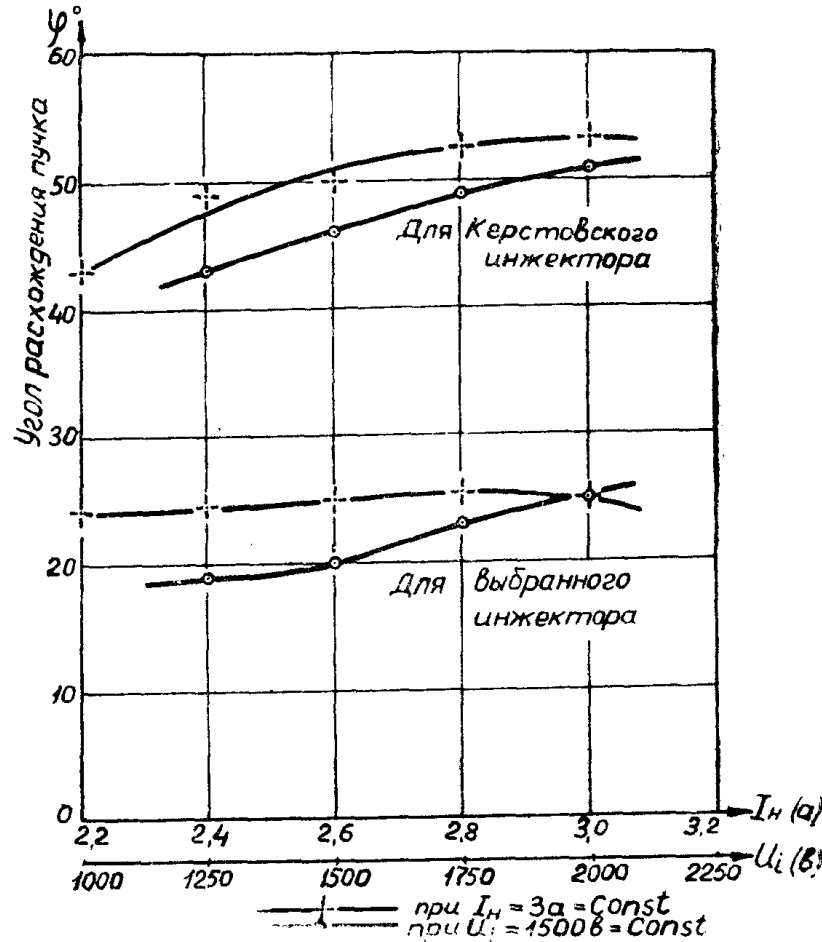


Рис. 6. Зависимость угла расхождения пучка от тока накала инжектора (при $U_i = \text{const}$) и напряжения инжекции (при $I_n = \text{const}$)

Оказывается, что как в случае учета объемного заряда, так и в случае пренебрежения им, для того, чтобы найти решение этих уравнений, надо знать распределение потенциала на оси симметрии в функции координаты z (по этой оси симметрии), т. е. $V_o(z)$ и четные производные от него.

В нашем случае распределение потенциала по оси z в области катод-анод (рис. 7) было найдено в виде следующих выражений:

$$V_o(z) = 100 \sin \frac{\pi z}{240} \quad \text{— для инжектора керстовского типа.}$$

$$V_o(z) = 50 \left(1 - \cos \frac{\pi z}{364} \right) \quad \text{— для выбранного инжектора.}$$

На основании анализа электрических полей в промежутке катод-анод для инжекторов разной геометрии (потенциал фокусирующего электрода равен потенциалу катода) можно сказать, что если для $V_o(z)$ вторая про-

изводная больше нуля, то здесь будет область фокусирования. Если для $V_o(z)$ вторая производная меньше нуля, то это область дефокусирования. Положение точки перегиба кривой $V_o(z)$ (точки максимума первой производной) определит степень фокусирования всей электронно-оптической системы. Если точки перегиба нет, то система будет либо фокусирующая, либо дефокусирующая (по указанному выше правилу).

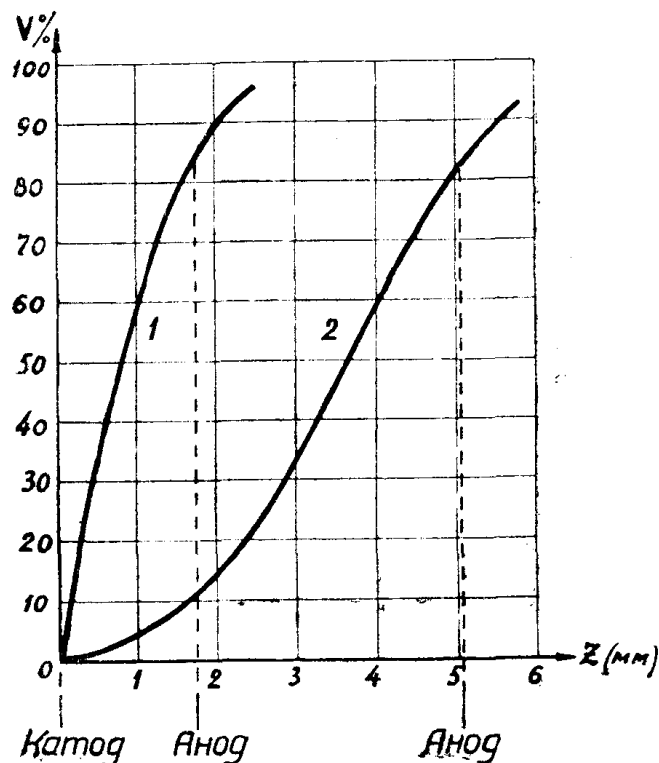


Рис. 7. Распределение потенциала в инжекторе 1 — для керстовского типа, 2 — для выбранного инжектора.

Можно считать, что для каждого определенного расстояния катод-анод должно существовать оптимальное распределение потенциала, дающее наименьший угол расхождения пучка. Такое оптимальное распределение потенциала можно получить соответствующей формой фокусирующего электрода и формой и размерами анодного отверстия.

Результаты проведенной работы, конечно, не могут быть окончательными исходными данными при конструировании и расчете инжекторов, а выбранный нами инжектор, видимо, еще нельзя назвать достаточно совершенным. Кроме того, мы не проводили исследования эмиссионных свойств различных катодов, электрической прочности при разных условиях и т. п.

Однако на основании проведенной работы можно сделать следующие предварительные выводы.

1. Форма и потенциал фокусирующего электрода определяют форму пучка из инжектора, поэтому целесообразно фокусирующий электрод выполнять подобно указанному на рис. 1 и подавать на него небольшой отрицательный потенциал относительно катода.

2. Пучок, выходящий из инжектора с катодом в виде спирали, вообще говоря, имеет неравномерное распределение плотности заряда от электронов, выходящих с внутренней поверхности спирали и боковых поверхностей витков. Спиральный катод дает также большое расхождение пучка

в вертикальном направлении и легко деформируется при работе. Поэтому можно предложить, например, оксидированный подогревной катод в виде цилиндра или полуцилиндра, что возможно для отпаянной камеры, или обычный накаливаемый, причем накал в этом случае лучше осуществлять импульсами, так как потребуются большой ток накала.

Для увеличения электрической прочности инжектора необходимо, кроме выбора нужных межэлектродных расстояний и тщательной обработки поверхности электродов, также устранить ионные токи между анодом и катодом. Это требование является весьма важным для повышения электрической прочности инжектора.

4. Чтобы сделать расчет или выбор геометрии инжектора возможным, правильным и теоретически обоснованным, необходимо прежде решить задачу—определить зависимость угла расхождения пучка от распределения потенциала на оси симметрии катод-анод и от положения точки перегиба кривой распределения этого потенциала. Для этого, безусловно, потребуются дополнительные экспериментальные данные.

Считаем целесообразным также при исследовании бетатронных инжекторов использовать впервые предложенный и примененный нами метод исследования пучка из инжектора в магнитном поле бетатронного типа.

При исследовании движения пучка на первом обороте в магнитном поле бетатронного типа при различных условиях нами были обнаружены также следующие факты.

Форма и траектории пучка весьма критичны к начальной плотности заряда пучка $\rho_{нач}$. Оказалось, что если

$$\rho_{нач} \approx (0,5 \div 1,0) \rho_{рав},$$

то пучок хорошо сфокусирован и медленнее спадает его плотность заряда на обороте.

Здесь

$\rho_{рав}$ — плотность равновесного пучка¹⁾.

Замечено, что при больших начальных плотностях заряда, порядка $\rho_{нач} \approx (5 \div 10) \rho_{рав}$, пучок сильно рассеивается по сути дела не заканчивая даже первого оборота, причем рассеяние пучка происходит на наружную стенку камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. F. Westendorf, F. R. Elder—Phys. Rev. 76. 445. 1949.
2. 6/a—Nucleonics—6. 72. 1950.
3. K. Gund—Stahl und Eisen—Jg. 73. 706. 1953.
4. Электронная микроскопия, под ред. А. А. Лебедева. Госиздательство технико-теоретич. литературы, Москва, 1954.
5. Носков Д. А. Кандидатская диссертация. Томский политехнический институт, 1954.
6. Воробьев А. А. Сверхвысокие электрические напряжения. ГЭИ. Москва, 1955.
7. Капцов Н. А. Электроника. Госиздательство технико-теоретич. литературы, Москва, 1954.

¹⁾ Понятие и метод определения „равновесного пучка“ даны в статьях Родимова Б. П. Известия ТПИ, т. 87, 1957