

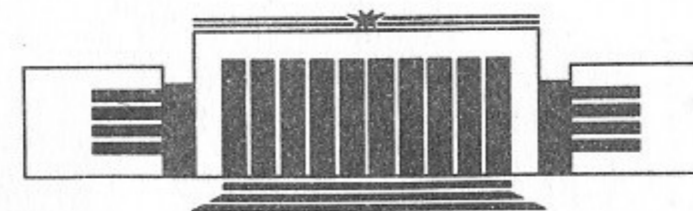


19  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Г.И. Кузнецов, М.А. Тиунов, В.П. Яковлев

ДИОДНАЯ ПУШКА  
С ВЫСОКОЙ КОМПРЕССИЕЙ ПУЧКА  
И ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ПРОЧНОСТЬЮ

ПРЕПРИНТ 89-161



НОВОСИБИРСК

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1985 году в ИЯФ СО АН СССР был создан новый СВЧ-генератор «Магникон» с высоким КПД [1]. Успешный запуск и испытание первого прибора подобного типа стимулировали разработку нового мощного импульсного «Магникона» сантиметрового диапазона волн. Такой генератор должен иметь источник электронов, формирующий пучок с импульсной мощностью несколько сотен мегаватт. Одновременно к пучку предъявляются следующие требования:

- а) диаметр пучка должен быть существенно меньше рабочей длины волны генератора;
- б) пучок должен иметь минимальный поперечный фазовый объем.

Обычно в качестве такого источника используется диодная пушка с первеансом, не превышающим  $2 \text{ мкА/В}^{3/2}$  [2, 3]. При этом требуемая мощность достигается за счет повышения рабочего напряжения до 300—400 кВ [3] и ограничивается электрической прочностью пушки. Получаемый в такой системе ток можно эмитировать только с катода размером, существенно превышающим рабочую длину волны генератора из-за ограничения плотности тока эмиссии современных катодов величиной  $J_{\text{max}} \sim 10 \text{ кА/см}^2$ . Для получения же пучка нужного диаметра может потребоваться его компрессия по площади в 1000 и более раз при условии минимизации его поперечного фазового объема и напряженности электрического поля на поверхностях формирующих электродов.

В данной работе предлагается вариант диодной пушки, в кото-

ром реализованы следующие основные параметры:

- а) микропервеанс  $P_\mu = 0.85 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ;
- б) коэффициент компрессии пучка по площади  $C_s = 400$  при нерелятивистских энергиях электронов\*);
- в) максимальная напряженность электрического поля на поверхности формирующего электрода  $E_{\max} = 2.8 U/d$ , где  $U$  — напряжение на пушке,  $d$  — зазор анод-катод;
- г) неоднородность плотности тока на катоде  $J_{\max}:J_{\min} = 1.4:1$ ;
- д) поперечный фазовый объем пучка на выходе из пушки определяется тепловым разбросом поперечных скоростей электронов.

Проведен детальный численный расчет предлагаемого варианта пушки с обоснованием используемой модели эмиссии с катода. Прделаны теоретические оценки основных факторов, которые могут повлиять на реально достижимую компрессию пучка в пушке. Приводятся результаты экспериментального исследования макета пушки с катодом диаметром 16.4 мм и максимальным рабочим напряжением 60 кВ.

## 2. ГЕОМЕТРИЯ ЭЛЕКТРОДОВ И РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУШКИ

Схематически геометрия электродов пушки приведена на рис. 1. Основной ее особенностью является достижение высокой компрессии электронного пучка при малом полуугле раствора сферического катода ( $\theta = 36^\circ$ ). В работе [4] приводится следующая эмпирическая формула для определения величины полуугла, полученная на основе анализа самых различных действующих пушек диодного, триодного и тетродного типов:

$$\theta = 12,9^\circ \cdot (P_\mu C_s^{1/2})^{1/2}, \quad (1)$$

где  $P_\mu$  — микропервеанс пушки,  $C_s$  — коэффициент компрессии пучка по площади.

В данной пушке величина полуугла примерно в полтора раза меньше рассчитанной по формуле (1). Поэтому, в сравнении с ранее разработанными пушками с близкими параметрами, значительно уменьшены неоднородность эмиссии с катода и максимальная напряженность электрического поля на прикатодном (формирующем) электроде. Вместе с этим оказывается возможным точно

\* При  $\gamma = 2$   $C_s \geq 1000$ .

компенсировать aberrацию анодной линзы. В результате, на выходе из пушки получается пучок с близким к однородному распределением плотности тока и расчетным поперечным эмиттансом, значительно меньшим теплового эмиттанса пучка.

Указанные результаты удалось получить за счет применения метода формирования пучка, использованного при разработке пушек для мощных импульсных клистронов [2, 3] с первеансом  $P_\mu \sim 2 \text{ мкА/В}^{3/2}$ . Однако коэффициент электростатической компрессии пучка по площади в этих пушках не превышает 16. Для разработки же новых мощных ВЧ-генераторов сантиметрового диапазона этот параметр необходимо увеличить как минимум на порядок.

До сих пор для формирования пучка с высокой компрессией использовалась оптика, условно изображенная на рис. 2. Значение угла  $\theta$  в такой пушке с хорошей точностью описывается формулой (1), а угол заделки прикатодного электрода превышает угол Пирса и составляет  $70-80^\circ$ . Этот фактор, а также влияние анодного отверстия приводит к тому, что неоднородность плотности тока эмиссии с катода такой пушки может достигать значений от 3 до 10, причем плотность тока резко возрастает к краю катода. Как показано в работе [5], радиус кривизны траекторий электронов вблизи катода однозначно связан с неоднородностью плотности тока эмиссии:

$$R = - \frac{5J}{dJ/dl}, \quad (2)$$

где  $l$  — координата вдоль поверхности катода. Из этого следует, что электроны на краю пучка сразу начинают отклоняться наружу от нормали к катоду, в то время как приосевые электроны движутся по нормали.

С одной стороны, это приводит к возникновению aberrации в пучке (в дальнейшем aberrация объемного заряда), противоположной по знаку aberrации анодной линзы. На выходе из пушки эти aberrации взаимно компенсируются, что позволяет получить пучок с малой неоднородностью плотности тока и малым эмиттансом. Отметим однако, что величина aberrации объемного заряда в такой пушке невелика вследствие быстрого выравнивания неоднородности плотности тока пучка в прикатодной области.

С другой стороны, уже вблизи катода резко падает угол сходимости пучка. Для компенсации этого эффекта приходится увеличи-

вать полуугол раствора катода и существенно изменять геометрию формирующего электрода, приближая его к аноду пушки.

Таким образом, в пушках подобного типа абберация объемного заряда задается увеличением угла заделки прикатодного электрода по сравнению с углом Пирса. Требуемая же компрессия пучка достигается увеличением полуугла раствора катода и изменением геометрии формирующего электрода вблизи анода. В результате, значительно увеличивается напряженность электрического поля на формирующем электроде. Это делает невозможным использование пушек такого типа для формирования релятивистских пучков электронов с высокой компрессией.

Для решения этой задачи и предлагается новый вариант диодной пушки. Ее геометрия определяется следующими основными параметрами (рис. 1):  $R_c$  — радиус кривизны катода;  $\theta$  — полуугол раствора катода;  $\alpha$  — угол заделки прикатодного электрода;  $L$  — длина конусного участка прикатодного электрода;  $\rho$  — радиус закругления прикатодного электрода;  $d$  — зазор между анодом и катодом.

Компрессия пучка в предлагаемой пушке достигается за счет уменьшения угла заделки прикатодного электрода по сравнению с углом Пирса ( $\alpha \sim 60^\circ$ ). Необходимое же для наличия абберации объемного заряда нарастание плотности тока к краю катода получается за счет влияния анодного отверстия и уменьшения продольного размера формирующего электрода. Неоднородность эмиссии с катода такой пушки не превышает 2. Длина конусного участка прикатодного электрода  $L$  зависит от угла  $\theta$  и требуемой компрессии пучка. Радиус закругления прикатодного электрода определяется максимально допустимой напряженностью электрического поля. Величина угла  $\alpha$  подбирается из требования минимизации эмиттанса пучка на выходе из пушки. При этом вплоть до расстояния  $\sim R_c/2$  от катода пушки электроны пучка очень слабо отклоняются от нормали к катоду. В результате, в этой области слабо меняется распределение плотности тока в пучке и набирается абберация объемного заряда, достаточная для компенсации абберации анодной линзы. Кроме того, на этом расстоянии пучок сохраняет угол сходимости, заданный катодом. После прохождения рассеивающей анодной линзы поток электронов остается сходящимся и в дрейфовом пространстве за анодом пушки радиус пучка уменьшается еще в 3-4 раза. Плоскость кроссовера в данной пушке располагается на расстоянии  $\sim 2R_c$  от центра катода.

Таким образом, в данной пушке за счет повышения рабочего

напряжения и коэффициента компрессии пучка по сравнению с оптикой, изображенной на рис. 2, удается на порядок повысить среднюю плотность тока в кроссовере даже при сравнительно малом первеансе. В табл. 1 и 2 приведены основные геометрические размеры и расчетные параметры макета такой пушки с катодом диаметром 16.4 мм. Здесь  $E_{\max}$  — максимальная напряженность электрического поля на прикатодном электроде;  $\epsilon$  — расчетный эмиттанс пучка на выходе из пушки (без учета тепловых скоростей электронов);  $\epsilon_T = \pi r_c \beta_T / (\beta \gamma)$  — «тепловой» эмиттанс пучка;  $\beta_T = (2kT_c / (mc^2))^{1/2}$ ;  $T_c$  — температура катода;  $k$  — постоянная Больцмана. Значение  $\epsilon_T$  приведено при напряжении на пушке  $U = 10$  кВ и температуре катода  $T_c = 0.2$  эВ.

Таблица 1

$R_c$ , см	$\theta$ , град	$\alpha$ , град	$L$ , см	$\rho$ , см	$d$ , см	$r_c$ , см
1.39	36.15	62.35	0.82	0.22	1.24	0.82

Таблица 2

$\rho_\mu$ , $\frac{\text{мкА}}{\text{В}^{3/2}}$	$\frac{E_{\max}}{U/d}$	$J_{\max}:J_{\min}$	$C_s$	$\epsilon$ , мрад·см	$\epsilon_T$ , мрад·см
0.85	2.8	1.4:1	400	0.1 п	3.6 п

Результаты расчета пушки программой SAM [6, 7] представлены на рис. 3. На рис. 3,а изображены полученные в расчетах эквипотенциали, распределение электрического поля вдоль оси пушки и распределение плотности тока эмиссии с катода пушки. На рис. 3,б показаны расчетные траектории электронов, а также распределение плотности тока по сечению пучка и его фазовый портрет на расстоянии 2 см от центра катода.

Кроме этого, численно был изучен вопрос о чувствительности таких основных параметров пушки, как первеанс, коэффициент компрессии и поперечный эмиттанс пучка на выходе из пушки, к точности изготовления и сборки отдельных ее узлов. Для этого исследовались зависимости от четырех геометрических параметров пушки: угла заделки и длины конусного участка фокусирующего электрода, радиуса кривизны катода и зазора катод — анод. Во всех этих расчетах температура катода считалась равной нулю («холодный» пучок). Правомомерность такого приближения будет показана ниже.

На рис. 4—7 представлены расчетные зависимости  $\rho_\mu$ ,  $C_s$  и  $\epsilon$

от геометрических параметров пушки. На рис. 4 показаны зависимости от угла заделки фокусирующего электрода. На рис. 5 приведены зависимости от длины конусного участка фокусирующего электрода. Зависимости основных параметров пушки от радиуса кривизны сферического катода при фиксированном параметре  $r_c = R_c \cdot \sin \theta$  и заданной геометрии фокусирующего электрода представлены на рис. 6. На рис. 7 показано как параметры пушки меняются с изменением зазора катод—анод. Отметим, что минимум поперечного эмиттанса пучка в этих расчетах соответствует наиболее близкому к однородному распределению плотности тока по сечению пучка на выходе из пушки.

### 3. МЕТОДИКА И ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ

Расчет электронной пушки проводился с помощью программы SAM, в которой используется следующая модель эмиссии с катода. На некотором малом расстоянии  $\delta$  от катода находится значение нормальной к его поверхности компоненты электрического поля  $E_n$  (с учетом собственного поля пучка). Значение плотности тока, эмиттируемого с катода, определяется из закона Чайльда—Ленгмюра для сферического диода:

$$J = A \frac{(r_a E_n / \beta(r_a) R_c)^{3/2}}{(\alpha(r_a) R_c)^{1/2}}, \quad (3)$$

где  $R_c$ —радиус кривизны сферического катода;  $r_a = R_c - \delta$ ;  $\alpha(r)$ —функция Ленгмюра [5];  $\beta(r) = -r(d\alpha/dr)$ ;  $A = (3e/2m)^{1/2} \epsilon_0$ ;  $\epsilon_0$ —диэлектрическая проницаемость вакуума.

Как показано в работе [7], на величину  $\delta$  накладываются следующие ограничения:

$$h \ll \delta \ll R, \quad (4)$$

где  $R$ —радиус кривизны траекторий электронов вблизи катода (формула 2), а  $h$ —максимальный размер ячейки сетки, покрывающей прикатодную область в осевом сечении для численного решения уравнения Пуассона (рис. 8). Вследствие условия  $\delta \ll R$  траектории считаются направленными по нормали к катоду в пределах расстояния  $\delta$ .

Однако в работе [8] показано, что плотность тока эмиссии и радиус кривизны траекторий обращаются в нуль на краю катода,

если угол заделки прикатодного электрода меньше пирсовского. Это делает невыполнимым условие (4) при любой величине параметра  $\delta$ .

С другой стороны, в той же работе показано, что в этом случае граница потока вблизи катода в осевом сечении остается прямой линией, отклоняющейся на некоторый угол от нормали к катоду в сторону оси пучка. В нашем случае этот угол равен  $3^\circ$ , что является малой величиной по сравнению с углом сходимости пучка. Плотность тока в данном случае обращается в нуль вблизи края катода по закону [8]:

$$J \propto x^{0.04}, \quad (5)$$

где  $x$ —расстояние от края катода. На рис. 9 изображены расчетное распределение плотности тока на катоде, полученное с помощью программы SAM, и распределение с учетом зависимости (5), нормированное на расчетную плотность тока в центре катода. Полный ток с катода, рассчитанный по этим двум распределениям, отличается менее чем на 7%.

Таким образом, используемая в программе SAM модель в данном случае достаточно хорошо описывает эмиссию с катода при непирсовском угле заделки формирующего электрода.

Важным фактором, влияющим на размер пучка в кроссовере, может оказаться конечный поперечный фазовый объем пучка, определяемый размером и температурой катода. В программе SAM не учитывается тепловой разброс поперечных скоростей электронов пучка. Это является хорошим приближением при расчете динамики пучка вплоть до вылета электронов за анодное отверстие пушки, так как угол сходимости пучка здесь еще много больше теплового углового разброса. Однако вблизи кроссовера это утверждение становится неверным. С другой стороны, распределение плотности тока по сечению пучка за анодным отверстием близко к однородному и для расчета размера «теплого» пучка в кроссовере можно воспользоваться уравнением Владимирского—Капчинского [9] для огибающей пучка:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{\epsilon^2}{r^3} + \frac{2J}{r}. \quad (6)$$

Здесь  $r, z$ —координаты огибающей пучка;  $\epsilon$ —эмиттанс;  $J = eI/(mc^3 \beta^3 \gamma^3) = I(A)/(17000 \beta^3 \gamma^3)$ . Интегрируя один раз уравнение (6) и полагая, что в кроссовере  $r = r_0, dr/dz = 0$ , получим:

$$\left(\frac{dr}{dz}\right)^2 = \frac{\varepsilon^2}{r^2} (C^2 - 1) + 4J \ln(C), \quad (7)$$

где  $C = r/r_0$  — коэффициент компрессии пучка по радиусу;  $r$  и  $dr/dz$  — значения радиуса и тангенса угла наклона огибающей пучка на некотором расстоянии за анодным отверстием пушки, где еще можно пренебречь тепловым разбросом поперечных скоростей электронов. Эти значения определялись с помощью программы SAM и в нашем случае при  $z = 2$  см равны:  $r = 0.11$  см,  $dr/dz = -0.17$ . Подставляя эти значения в уравнение (7), при  $\varepsilon = 0$  получим  $r_0 = 0.036$  см, а при  $\varepsilon = 3.6 \cdot \pi$  мрад·см ( $T_c = 0.2$  эВ,  $U = 10$  кВ),  $r_0 = 0.065$  см.

Более точный расчет поведения пучка вблизи кроссовера был проведен с помощью вычислительной программы, в которой тепловой разброс моделировался методом Монте-Карло. На рис. 3,б приведены полученные в расчетах огибающие пучка вблизи кроссовера ( $z_0 = 2.7$  см) при  $\varepsilon = 0$  (штриховая линия) и  $\varepsilon = 3.6 \cdot \pi$  мрад·см (непрерывная кривая). На рис. 10 показаны расчетные распределения плотности тока в кроссовере для «холодного» и «теплого» пучков. Видно, что тепловой разброс поперечных скоростей электронов приводит к размытию края пучка. Однако, если за размер пучка принять радиус, на котором плотность тока падает вдвое, то он с большой точностью совпадет с расчетным размером «холодного» пучка. Это означает, что даже при низких напряжениях на пушке тепловой фазовый объем пучка в малой степени влияет на размер пучка в кроссовере. Расчетный радиус огибающей «теплого» пучка в кроссовере  $r_0 = 0.060$  см, что хорошо согласуется с оценкой по формуле (7).

Еще одним фактором, который может повлиять на размер пучка в кроссовере, является шероховатость поверхности катода. Так, если размер шероховатостей много больше расстояния до минимума потенциала вблизи поверхности катода или минимум вообще отсутствует (режим насыщения по току эмиссии), появляется дополнительный поперечный угловой разброс электронов пучка. Отметим, что этот разброс, в отличие от теплового, является чисто геометрическим фактором и не зависит от напряжения на пушке.

Характерный размер неоднородностей на поверхности катода из гексаборида лантана, как показывают измерения, может достигать 5—20 мкм. В свою очередь, наличие минимума потенциала и расстояние до него зависит от соотношения между максимально достижимой плотностью тока термоэмиссии и отбираемой с катода

плотностью тока. Плотность тока термоэмиссии описывается формулой Ричардсона — Дешмана [10]:

$$J_T = A T_c^2 \exp(-\omega/(k T_c)), \quad (8)$$

где  $\omega$  — работа выхода (для гексаборида лантана  $\omega = 2.8$  эВ),  $T_c$  — температура катода в К,  $A = 120$  А/(см·град)<sup>2</sup>.

Как показано в работе [10], расстояние до минимума потенциала, при выполнении условия  $0 < \ln(J_T/J_c) < 1$  ( $J_c$  — плотность тока, отбираемого с катода), описывается формулой:

$$Z_{\min} - Z_c = B \left( \frac{T_c^{3/2}}{J_c} \ln(J_T/J_c) \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где  $B = 2.175 \cdot 10^{-6}$  А<sup>1/2</sup>/град<sup>3/4</sup>. Ось  $Z$  здесь считается направленной по нормали к катоду.

В нашем случае максимальная плотность тока отбирается с края катода. При напряжении на пушке  $U = 40$  кВ эта величина, рассчитанная программой SAM, равна  $J_c = 3.5$  А/см<sup>2</sup>. Чтобы обеспечить такую плотность тока, температура катода из гексаборида лантана, как следует из формулы (8), должна быть не менее 1760 К. Допустим теперь, что катод перегрет на 40 К и в результате  $J_T = 5.7$  А/см<sup>2</sup>. Подставляя эти значения в формулу (9), получаем  $Z_{\min} - Z_c = 2.2$  мкм. Видно, что в этом случае на краю катода расстояние до минимума потенциала сравнимо с характерным размером шероховатостей. В центре катода ситуация не намного лучше, поскольку там  $J_c = 2.35$  А/см<sup>2</sup> и  $Z_{\min} - Z_c = 3.7$  мкм.

Таким образом, даже значительный запас по плотности тока термоэмиссии (перегрев катода) не позволяет полностью избавиться от влияния шероховатостей катода на поперечный фазовый объем пучка.

#### 4. ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки расчетов был изготовлен макет диодной пушки, эскиз которого и схема эксперимента показаны на рис. 11. Макет целиком помещался в металлический вакуумный объем с безмасляной откачкой (рабочий вакуум  $1 - 2 \cdot 10^{-7}$  торр).

Был применен катод из гексаборида лантана диаметром 16.4 мм с прикатодным электродом из графита, чтобы обеспечить четкую границу между эмиттирующей и фокусирующей поверхнос-

тями. Нагреватель катода — вольфрамовая спираль. Фокусирующий электрод, катодный фланец и анод изготовлены из нержавеющей стали. Они сделаны массивными, чтобы избежать большого перепада температуры по радиусу и, тем самым, изменения геометрии пушки в результате нагрева. Холодные размеры в пушке установлены с учетом расчетного распределения температуры в ее элементах. Анодное отверстие и катод юстированы по фокусирующему электроду; точность выставки продольных и поперечных размеров не хуже 0.1 мм. Анодный изолятор изготовлен из керамики 22ХС с медными электродами. В анодном электроде сделана проточка под тракт транспортировки пучка, в котором размещается устройство для измерения огибающей пучка. Ток, прошедший через анод и тракт транспортировки, измерялся цилиндром Фарадея из графита ( $\varnothing$  7 мм,  $L=26$  мм).

Огибающая пучка вблизи кроссовера получена методом прожигания фольг, последовательно помещаемых вдоль траектории пучка и фиксируемых диском. Была выбрана фольга из тантала толщиной 10 микрон. При применении более легкоплавких материалов трудно учесть влияние фронтов импульса высокого напряжения и ореола пучка на размер отверстий, прожигаемых пучком.

Оценим тепловые нагрузки на фольгу. При основном рабочем напряжении 40 кВ, длительности импульса 1 мкс и расчетной площади пучка в кроссовере  $S=5 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup> удельная импульсная мощность нагрева составляет

$$P = \frac{UI}{S} = 5.44 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2, \quad (10)$$

средняя плотность тока в кроссовере при этом 1360 А/см<sup>2</sup>. Согласно [11], это привело бы к нагреву поверхности фольги до  $T=4.2 \cdot 10^4$  °С, что более чем на порядок превышает температуру плавления тантала и, естественно, вызывает взрыв фольги.

С другой стороны, нижний уровень плотности мощности, который может оставить след подплавления на поверхности фольги в кроссовере — величина порядка  $3.5 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, что при микропервое  $P_{\mu}=0.85$  и той же площади пучка в кроссовере, соответствует напряжению 13.4 кВ и току 1.3 А (плотность тока 260 А/см<sup>2</sup>).

Полезно также оценить плотность тока при энергии пучка 40 кВ и длительности импульса 1 мкс, которая нагревает поверхность тантала до температуры плавления. Она равна 87.5 А/см<sup>2</sup>, то есть в 15 раз ниже ожидаемой плотности тока в кроссовере.

При этом максимальная площадь, на которой останется след подплавления фольги пучком равна  $7.5 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup> или круг диаметром 0.31 см. Отсюда следует, что для успешного прожигания фольги вдали от кроссовера необходимо увеличить длительность импульса.

Распространением тепла в фольге по радиусу можно пренебречь, так как, согласно [11], например, для вольфрама толщиной 10 мкм за 1 мкс температура повышается на 1% на расстоянии  $3 \cdot 10^{-3}$  см, что составляет всего 7% размера пучка в кроссовере. Заметный нагрев фольги будет происходить на расстоянии еще на порядок меньшем.

Схема эксперимента показана на рис. 11. На катод подавался отрицательный импульс высокого напряжения. Токи на анод и в цилиндр Фарадея измерялись с сопротивлений в 1 Ом, ток с катода — трансформатором тока с коэффициентом трансформации 1 В/А. Все величины измерялись с экрана осциллографа с точностью 5%.

Основные эксперименты проводились при напряжении 40 кВ и длительности импульса 6 мкс. Впоследствии на фольги, поставленные в найденный кроссовер, подавался пучок с энергией от 10 до 60 кВ при длительности импульса 1 и 6 мкс. Мощность накала выбиралась с таким запасом, чтобы надежно уйти от режима насыщения. Токооседание на анод без фольги составляло 2—3% полного тока. Сюда входит ток с прикатодного фокусирующего электрода и ток, отраженный от коллектора.

Эксперимент проводился следующим образом. При получении рабочего вакуума с нагретым катодом накал выключался. После некоторого остывания включалось импульсное тренировочное напряжение до 65 кВ и частотой несколько герц, чтобы избежать пробоев в рабочих импульсах. Затем выставлялось необходимое импульсное напряжение и управление переводилось в режим ручного запуска. Включался накал, контролировалась привязка запуска к нулю тока накала (не хуже  $5 \cdot 10^{-3}$  амплитудного значения тока). После 5-минутного прогрева катода производилось от 5 до 50 запусков импульсов высокого напряжения, при которых контролировались напряжение и ток с катода, токи на анод и цилиндр Фарадея. После остывания пушки объем вскрывался и менялась фольга.

На рис. 12,а показаны осциллограммы высокого напряжения при длительности импульса 1 и 6 мкс. При размещении фольги в плоскости кроссовера после 2-3 выстрелов токи на анод и цилиндр Фарадея стабилизируются. Осциллограммы токов на анод в этом

случае с уже прожженной фольгой показаны на рис. 12,б. При удалении от кроссовера требуется большее количество импульсов для стабилизации токов.

Рассмотрим осциллограмму тока на анод (рис. 12,б) при длительности импульса 1 мкс. Передний выброс содержит емкостной ток и часть тока пучка, сформированного передним фронтом импульса напряжения. Затем следует ток, попадающий на край отверстия, скорее всего, из «теплового ореола» пучка, плюс токооседание на анод без фольги. Некоторое увеличение тока на анод к концу импульса по сравнению с передним фронтом вероятно связано с газовой выделением с краев отверстия в фольге при разогреве ее падающим током и последующей ионизацией газа. Если считать минимальное токооседание на анод за токооседание без влияния газовой выделения, то вблизи кроссовера через прожженное отверстие проходит 93—96% тока пучка без учета отражения от коллектора.

На рис. 13 представлена диафрагма, полученная в эксперименте в точке кроссовера. Видно, что отверстие имеет слегка эллиптическую форму (соотношение осей 0.82:0.78 мм), что, как потом выяснилось, связано с неточным сопряжением края катода и фокусирующего электрода. Края фокусирующего электрода в противоположных местах выступали не более чем на 0.1 мм над краем катода, что, видимо, и привело к дополнительной фокусировке пучка. Поэтому за размер отверстия бралась большая ось. При другом, более аккуратно выполненном катоде, отверстия имели круглую форму диаметром 0.80—0.81 мм.

Приведенная выше оценка нагрева фольги и сравнение полученной в эксперименте ширины зоны подплавления края фольги в кроссовере ( $\sim 0.1$  мм) показывают, что в зоне подплавления плотность тока невелика и это «тепловой ореол» пучка.

На рис. 14 точками представлена полученная в эксперименте огибающая пучка. При этом точность определения продольной координаты фольги в горячем состоянии пушки не хуже  $\pm 0.2$  мм. Там же показана расчетная огибающая пучка (кривая 1) при поперечной температуре пучка на катоде  $T_c = 0.2$  эВ. Она соответствует плотности тока на краю пучка, при которой начинается плавление фольги. Как видно из рисунка, экспериментальный кроссовер находится на  $z = 24.5$  мм вместо 27 мм расчетных. Кроме того, полученная в эксперименте форма огибающей пучка сильно отличается от расчетной при  $T_c = 0.2$  эВ.

Прежде всего, это влияние неточного описания эмиссии с края катода с непирсовским углом заделки. Предсказываемое теорией

отклонение огибающей пучка вблизи катода на 3 градуса внутрь от нормали к катоду вполне может привести к увеличению углов сходимости электронов вблизи края пучка и, как следствие, искажению формы огибающей вблизи кроссовера. Еще одним фактором, объясняющим результаты эксперимента, может быть большая поперечная температура пучка, возникающая вследствие шероховатости катода.

Для моделирования этих эффектов в расчетную зависимость угла сходимости электронов пучка от радиуса при  $z = 20$  мм (рис. 3,б) была введена кубическая нелинейность таким образом, чтобы углы сходимости не менялись вблизи центра и увеличивались к краю пучка. Варьированием величины максимального угла сходимости и поперечной температуры пучка удалось получить расчетную огибающую пучка, близкую к экспериментальной (рис. 14, кривая 2). При этом для края пучка угол сходимости был увеличен с расчетных 170 мрад (при  $z = 20$  мм) до 215 мрад. Поперечная температура пучка на катоде в этом расчете принималась равной  $T_c = 2$  эВ.

На рис. 15 показана зависимость измеренного в эксперименте диаметра пучка в кроссовере ( $z = 24.5$  мм) от энергии электронов. Видно, что диаметр уменьшается с ростом энергии до 40 кВ, а далее увеличивается. Уменьшение связано, видимо, с уменьшением влияния «тепла» при возрастании энергии пучка и релятивистским фактором, а увеличение — с ростом вкладов фронтов импульса напряжений при увеличении энергии пучка.

На рис. 16 показана зависимость диаметра пучка в кроссовере от тока накала. Наличие магнитного поля нагревателя на катоде пушки оказывает большое влияние и уменьшает компрессию пучка по площади на порядок.

Из всего этого следует, что для достижения высокой электростатической компрессии интенсивного электронного пучка необходимо учитывать все указанные факторы.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена диодная пушка с большой компрессией пучка по площади и пониженной напряженностью электрического поля на прикатодном (формирующем) электроде. В данной пушке в 1.5 раза уменьшен полуугол раствора сферического катода по



сравнению с существующими пушками с близкими параметрами, что, в свою очередь, позволило существенно уменьшить неоднородность эмиссии с катода пушки. Высокая компрессия пучка достигается за счет уменьшения угла заделки прикатодного электрода по сравнению с углом Пирса и точной компенсации аберрации анодной линзы. Малую напряженность электрического поля на прикатодном электроде удается получить за счет уменьшения его продольного размера, а также применения анодного электрода специальной формы.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование макета такой пушки, показавшее реальную достижимость расчетных параметров. Экспериментально получена электростатическая компрессия пучка по площади  $C_s=400$ . При этом средняя плотность тока пучка в кроссовере достигает  $2 \text{ кА/см}^2$  при энергии электронов 60 кэВ.

При увеличении размеров предлагаемой пушки и соответственно рабочего напряжения можно за счет релятивистского фактора повысить электростатическую компрессию пучка по площади до 1000 при микропервесе порядка  $1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ . Пушка с такими параметрами может служить источником электронов для нового импульсного СВЧ-генератора «Магникон» сантиметрового диапазона волн при мощности в пучке несколько сотен мегаватт. Пушки подобного типа могут также найти широкое применение и в других мощных СВЧ-приборах сантиметрового диапазона.

В заключение авторы выражают благодарность О.А. Нежевенко за инициирование, поддержку и обсуждения результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Karliner M.M., Kozyrev E.V., Makarov I.G., Nezhevenko O.A., Ostreiko G.N., Persov B.Z., Serdobintsev G.V. The Magnicon—An Advanced Version of the Gyrocon. NIM—A269 (1988) p.459—473.
2. Konrad G.T. High Power RF Klystrons for Linear Accelerators.—SLAC-PUB-3324, 1984.
3. Lee T.G., Lebacqz J.V., Konrad G.T. A Fifty Megawatt Klystron for the Stanford Linear Collider.—SLAC-PUB-3214, 1983.
4. True R. A Theory for Coupling Gridded Gun Design with PPM Focusing.—IEEE Transaction on Electron Devices, 1984, v.ED-31, N3.
5. Кирштейн П., Кайно Г., Уотерс У. Формирование электронных пучков.—М.: Мир, 1970.

6. Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. Проектирование электронных пушек. Труды XIII международной конференции по ускорителям частиц высокой энергии. Новосибирск, 1987, т.1.
7. Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. SAM—интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ.—Препринт 87-35 ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1987.
8. Lomax R.J. The Effect of the Inclination of the Focusing Electrodes on Electron Beam Formation.—J. Electronics and Control, 1959, v.6, N1.
9. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей.—Энергоиздат, 1982.
10. Nottingham W.D. Thermionic Emission.—Handbuch der Physik, Springer Verlag, Berlin, 1956, v.21.
11. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы.—М.: Советское Радио, 1975.

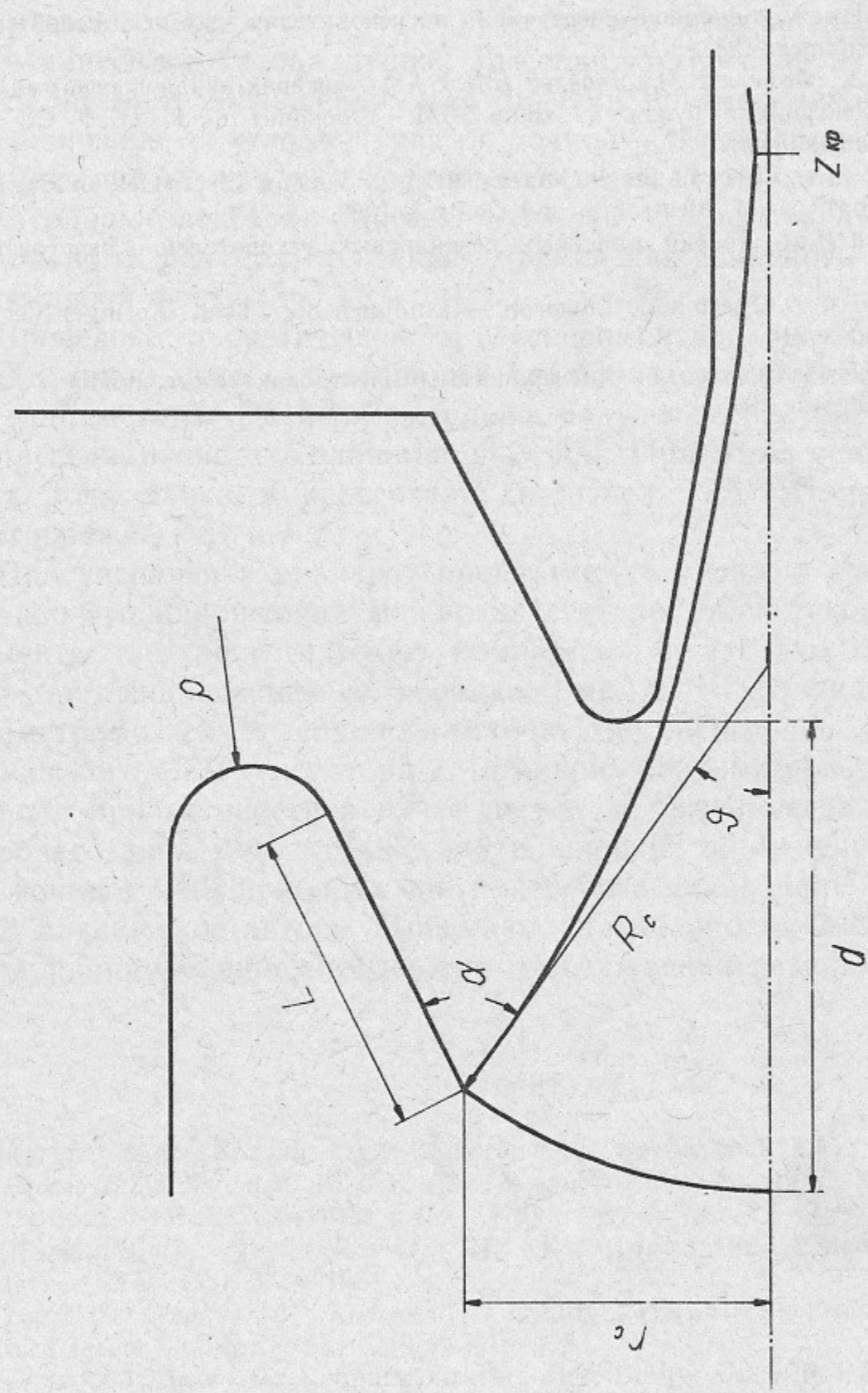


Рис. 1. Геометрия электродов диодной пушки с высокой компрессией. пучка и повышенной электрической прочностью.

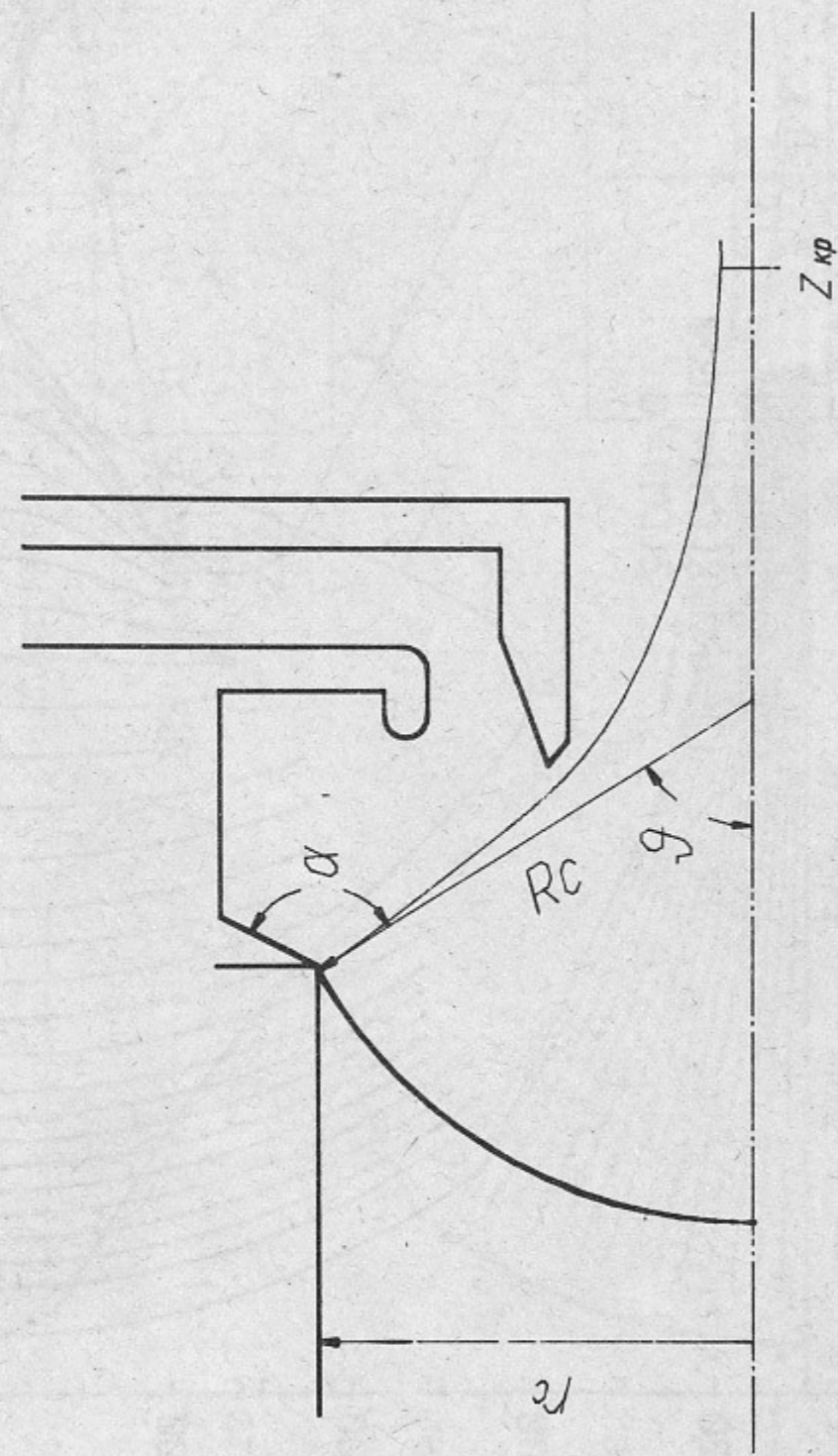


Рис. 2. Типичная геометрия электродов диодной пушки с высокой компрессией пучка.

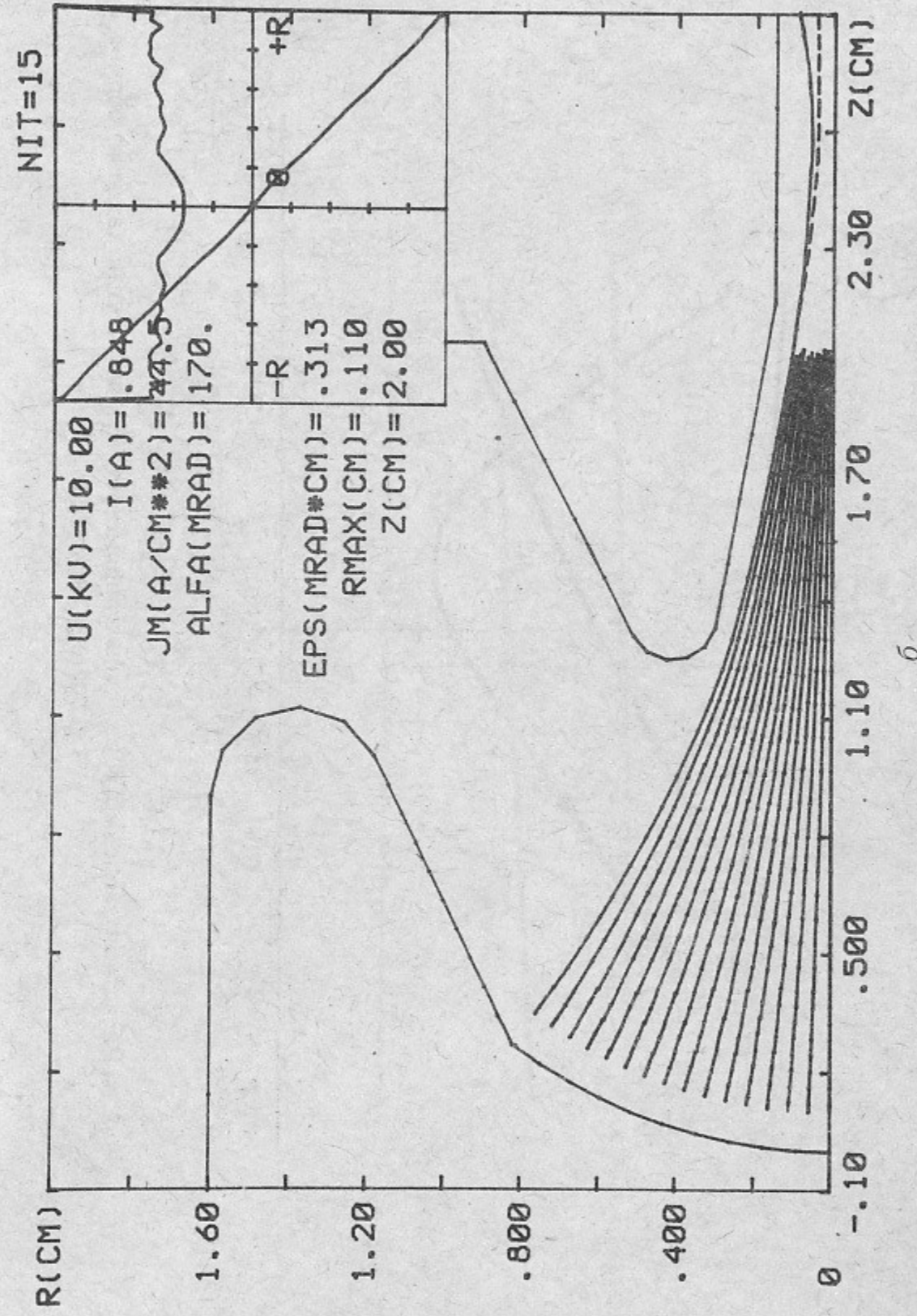
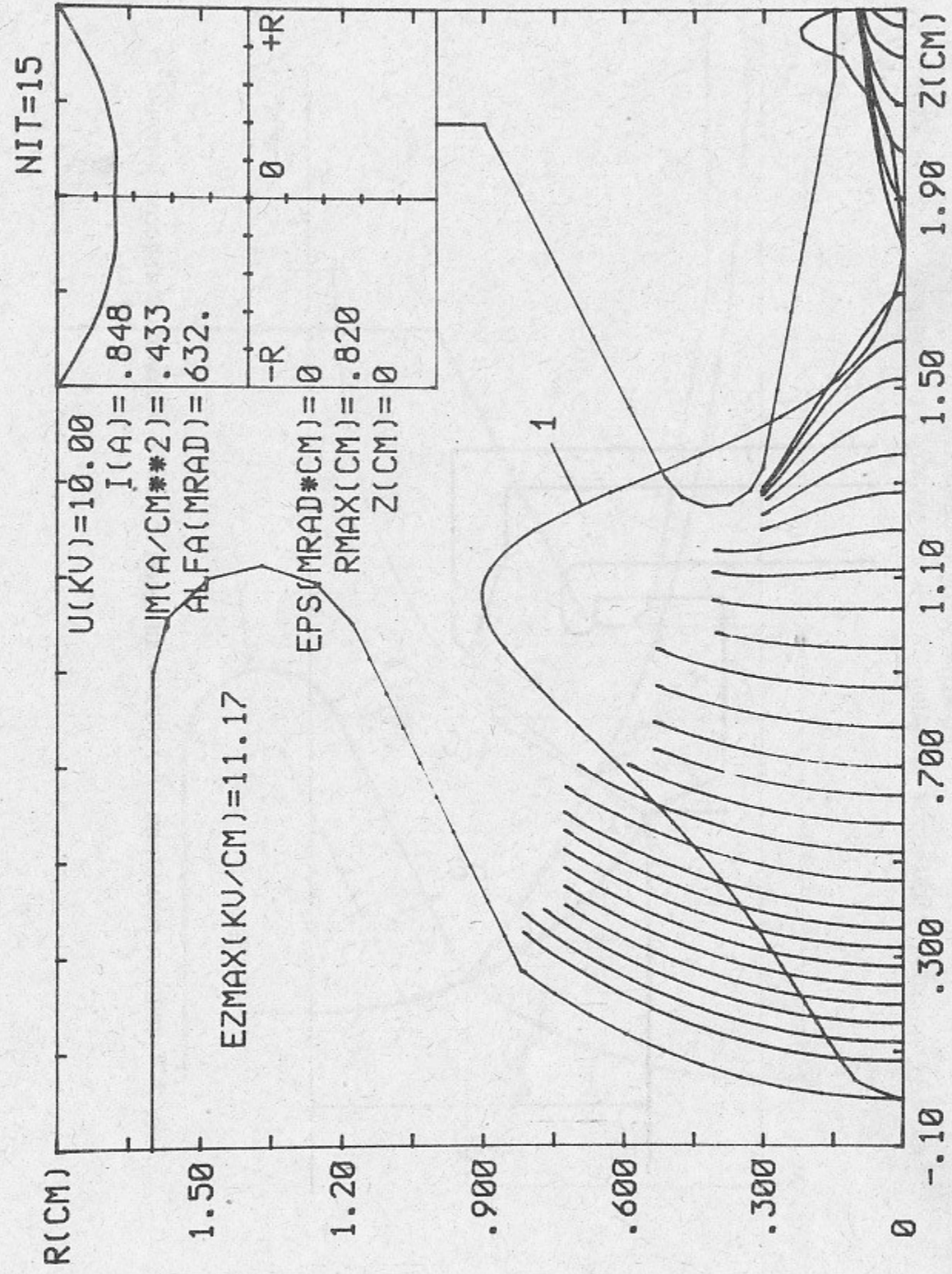


Рис. 3. Результаты расчета программой SAM диодной пушки с высокой компрессией и повышенной электрической прочностью:

а — эквипотенциали, поле вдоль оси (кривая 1, масштаб указан на рисунке); в правом верхнем углу параметры пучка и распределение плотности тока на катоде; б — траектории электронов в пушке, в правом верхнем углу распределение плотности тока по сечению пучка на выходе из пушки и фазовый портрет при  $z=2$  см.

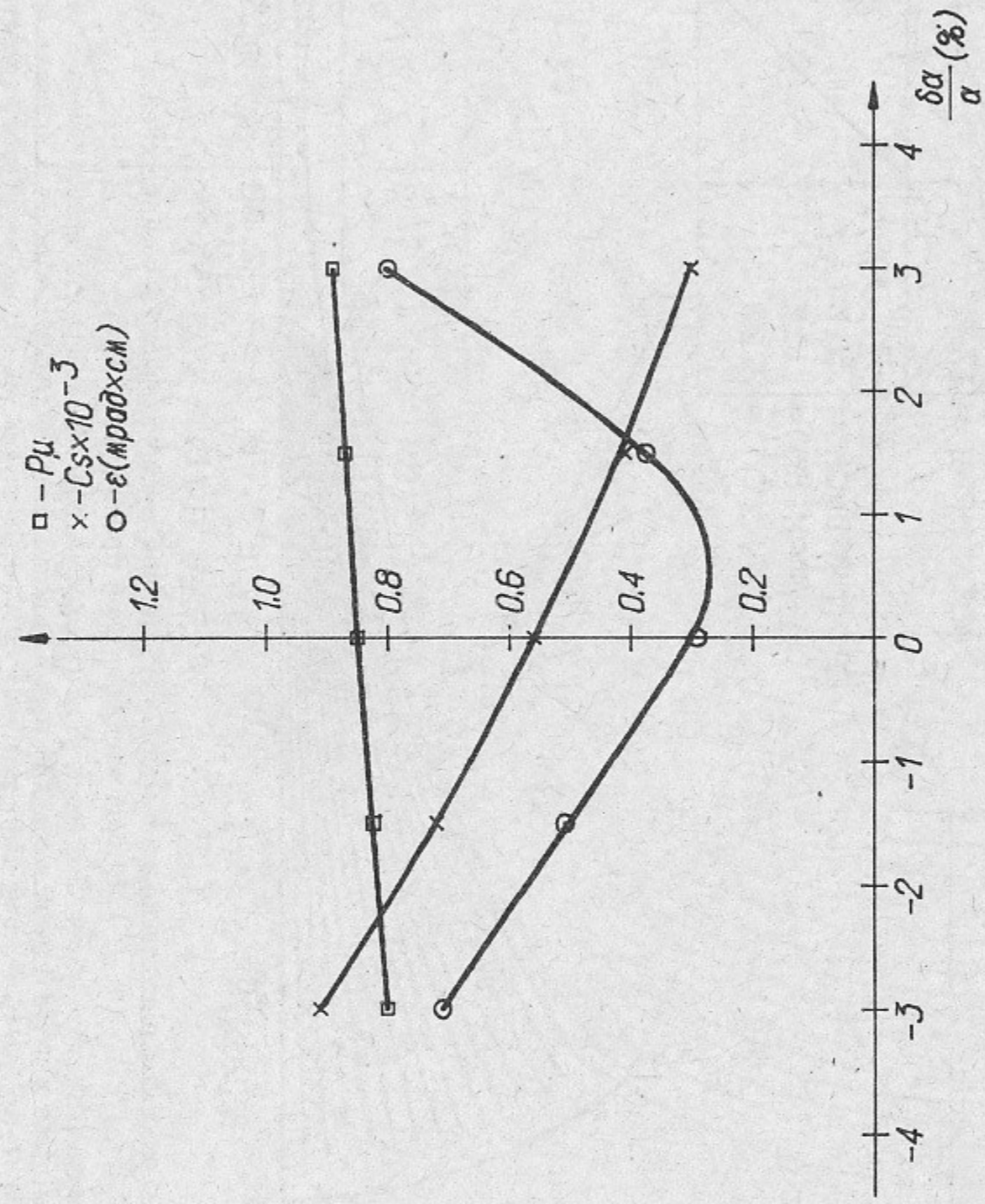


Рис. 4. Расчетная зависимость основных параметров пушки от угла заделки формирующего электрода.

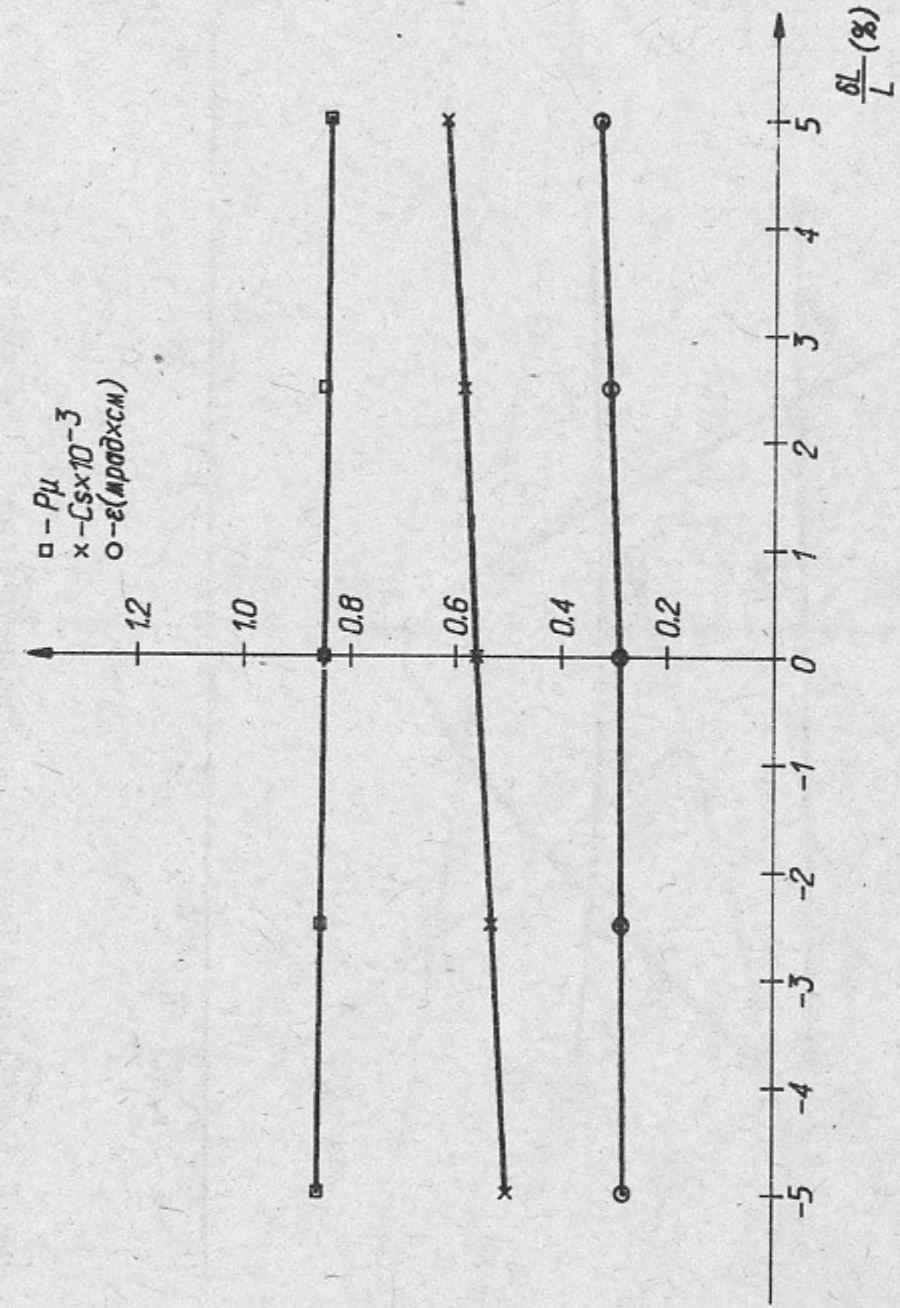


Рис. 5. Расчетная зависимость основных параметров пушки от длины конусного участка фокусирующего электрода.

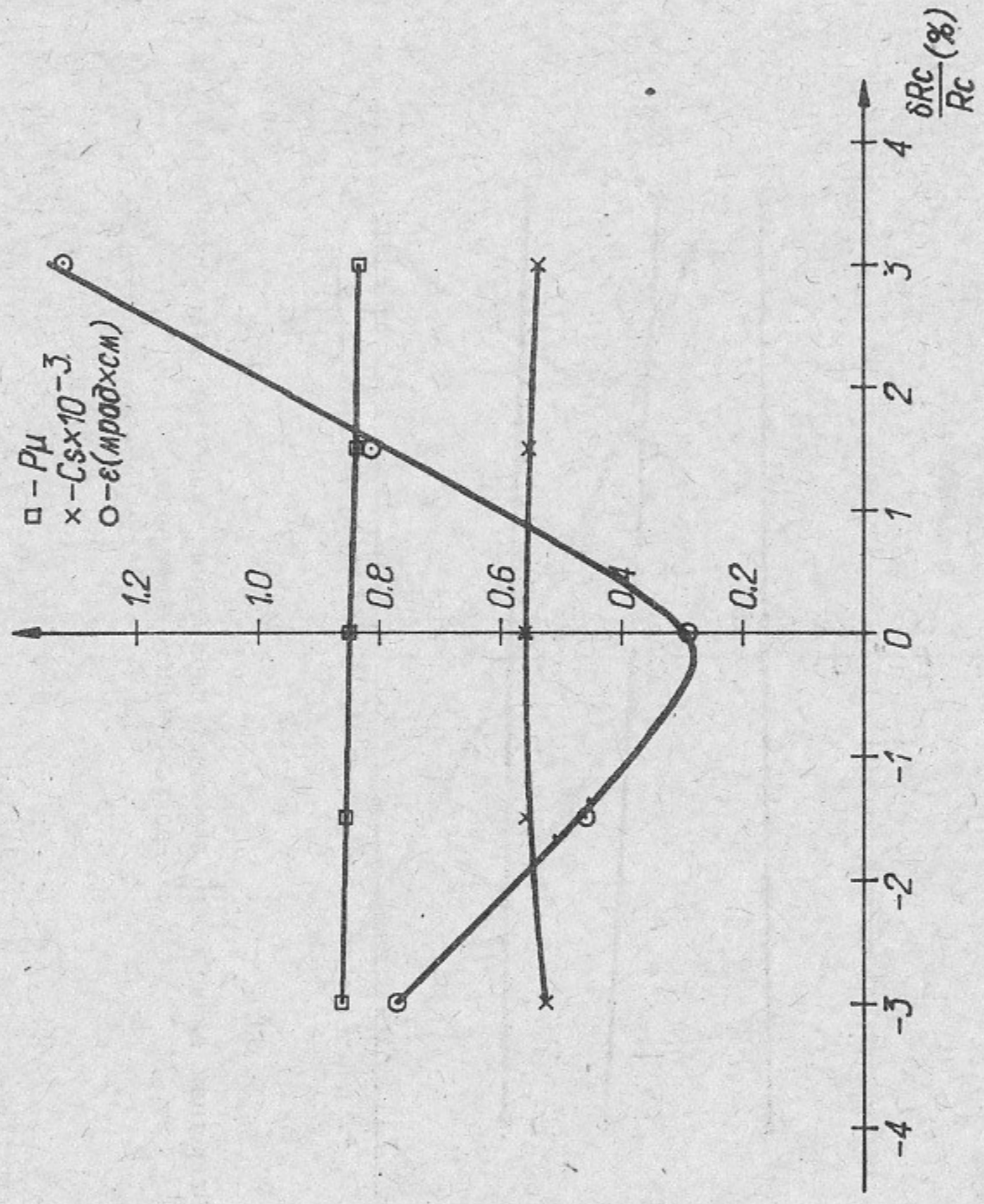


Рис. 6. Расчетная зависимость основных параметров пушки от радиуса кривизны катодной сферы при фиксированном диаметре катода.

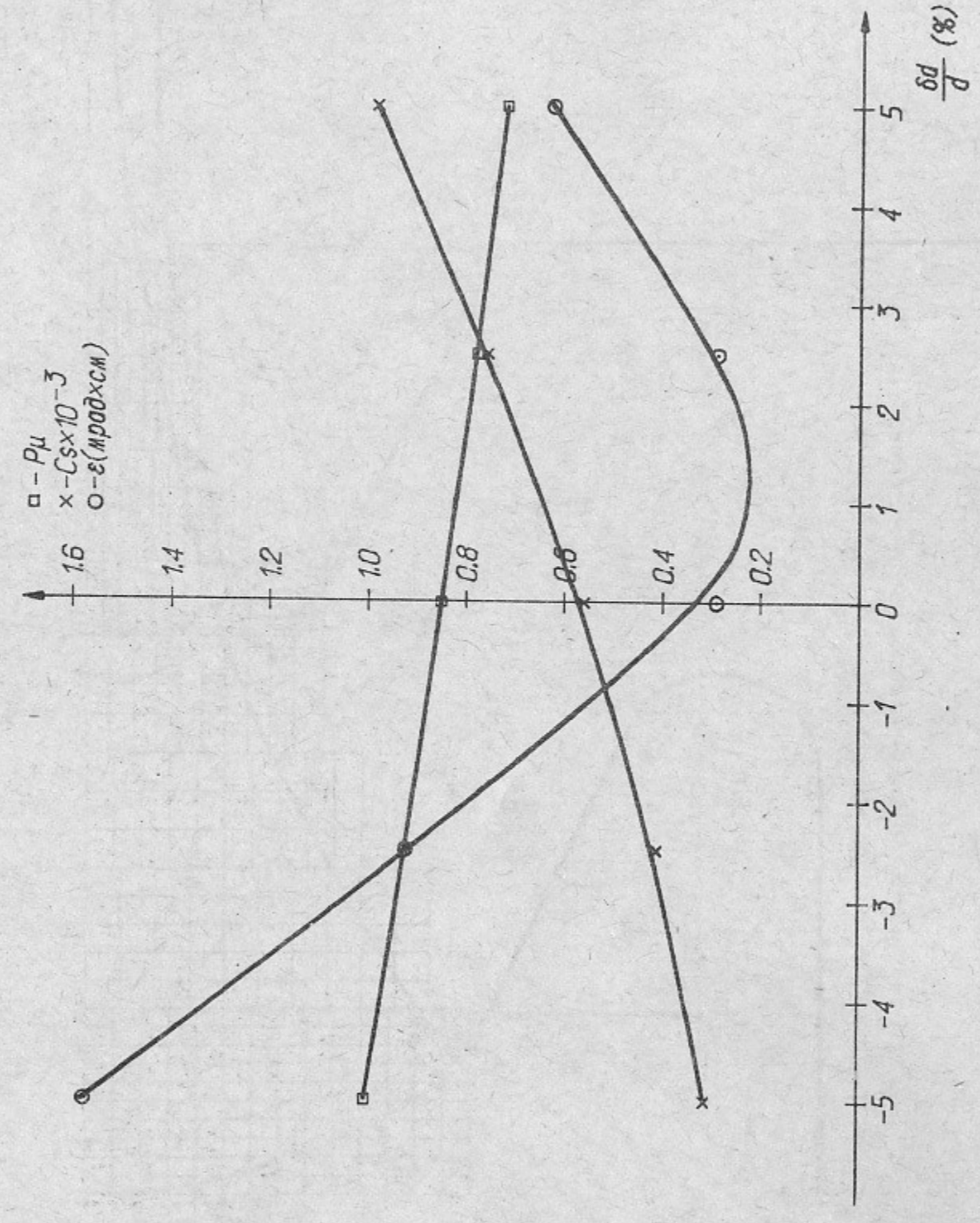


Рис. 7. Расчетная зависимость основных параметров пушки от зазора анод — катод.

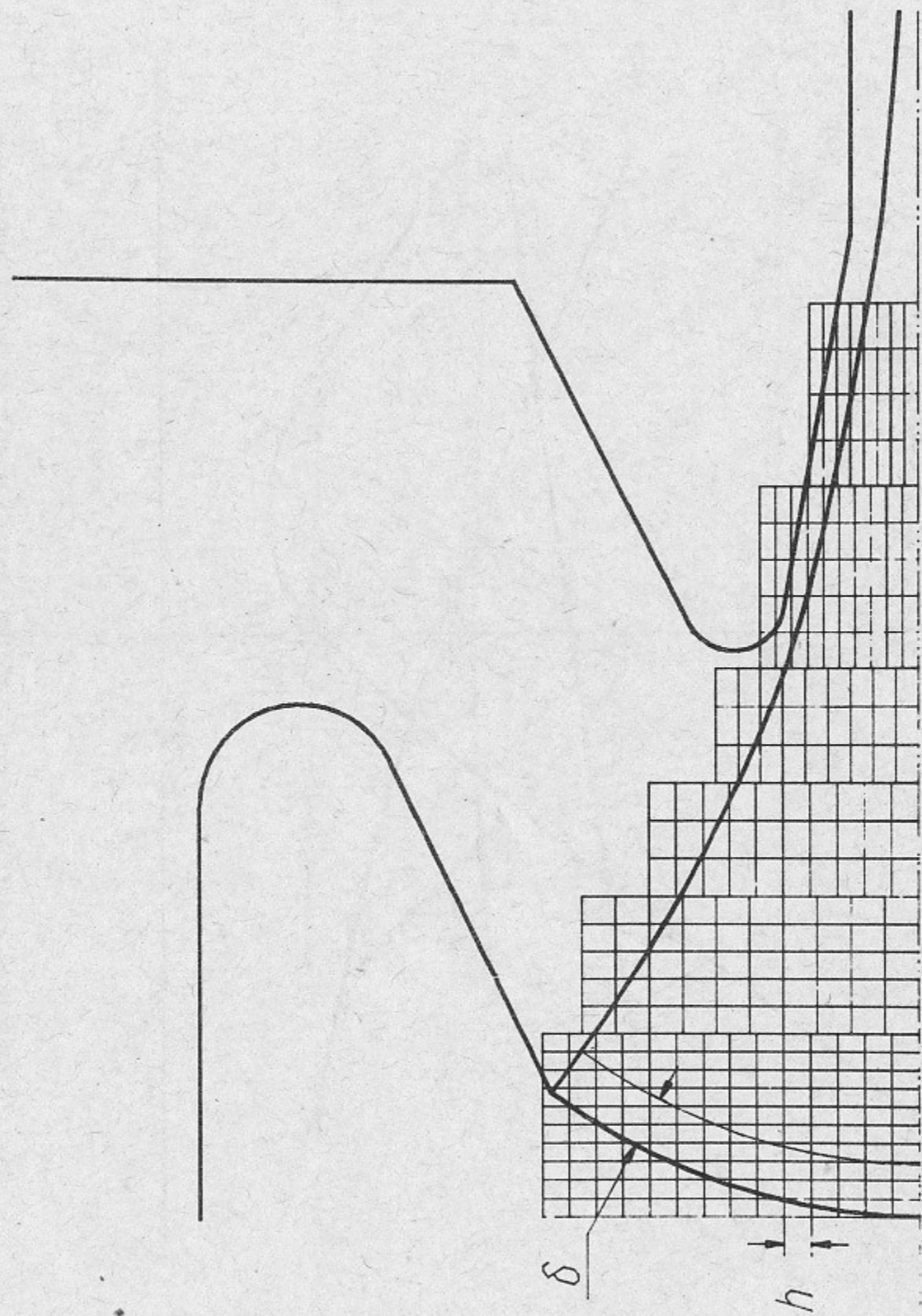


Рис. 8. Геометрия электродов пушки и сеток для описания объемного заряда пучка.

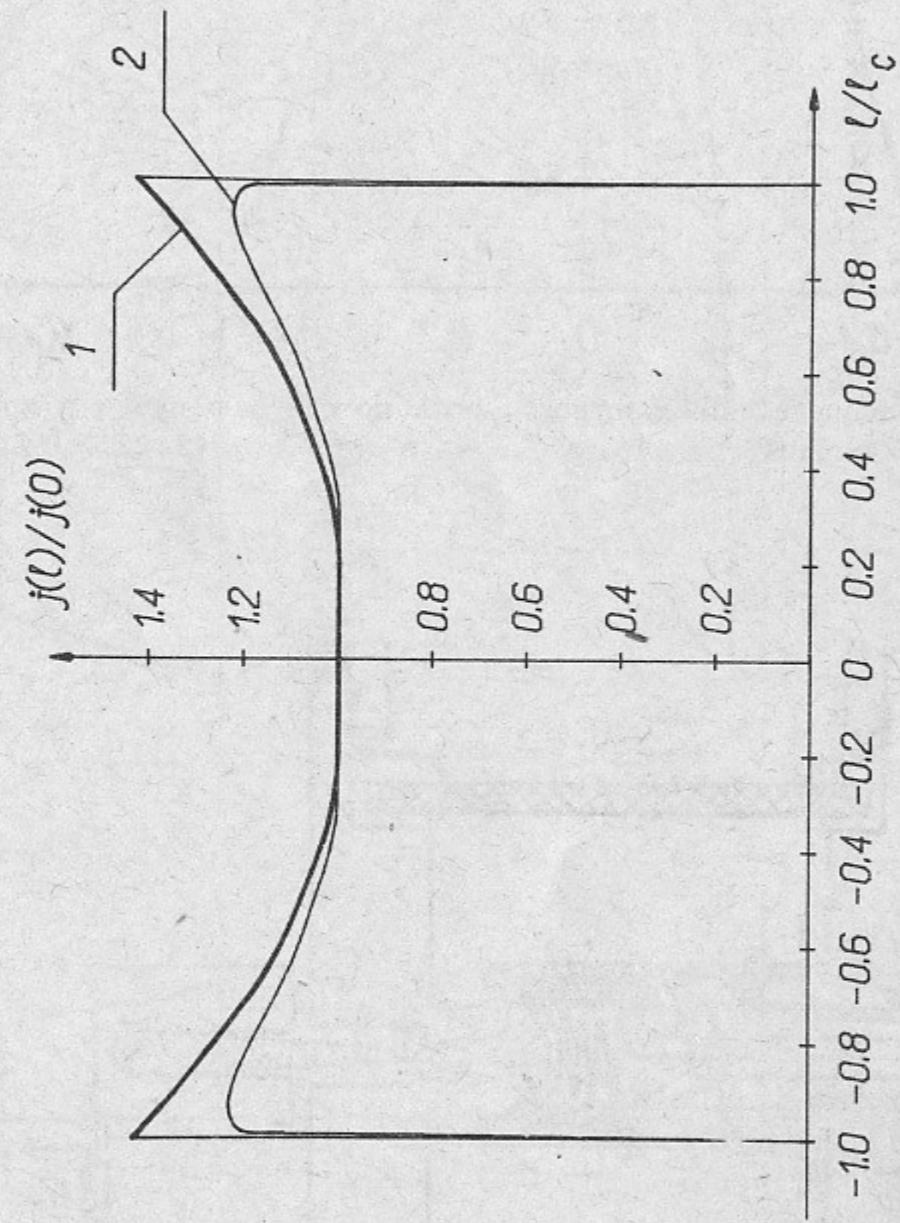


Рис. 9. Расчетное распределение плотности тока на катоде пушки (1) и распределение, полученное с учетом теории Ломакса [8] (2).

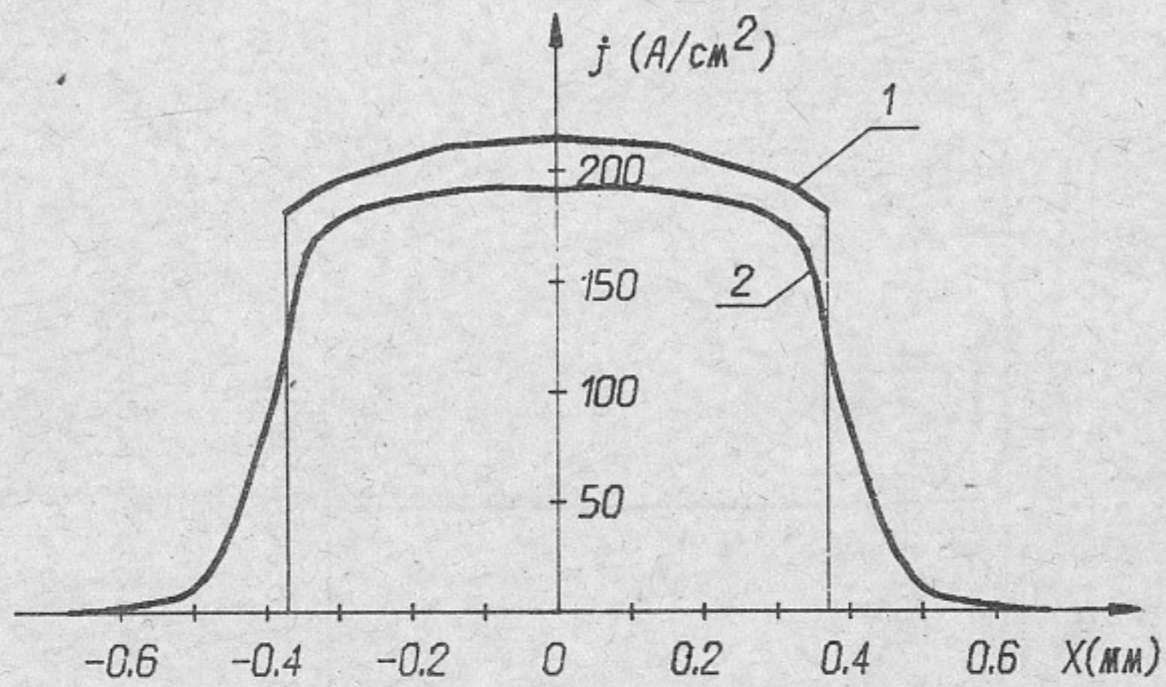


Рис. 10. Расчетные распределения плотности тока по сечению пучка в кроссовере для «холодного» (1 — температура катода  $T_c=0$ ) и «теплого» (2 —  $T_c=0.2$  эВ) пучка.

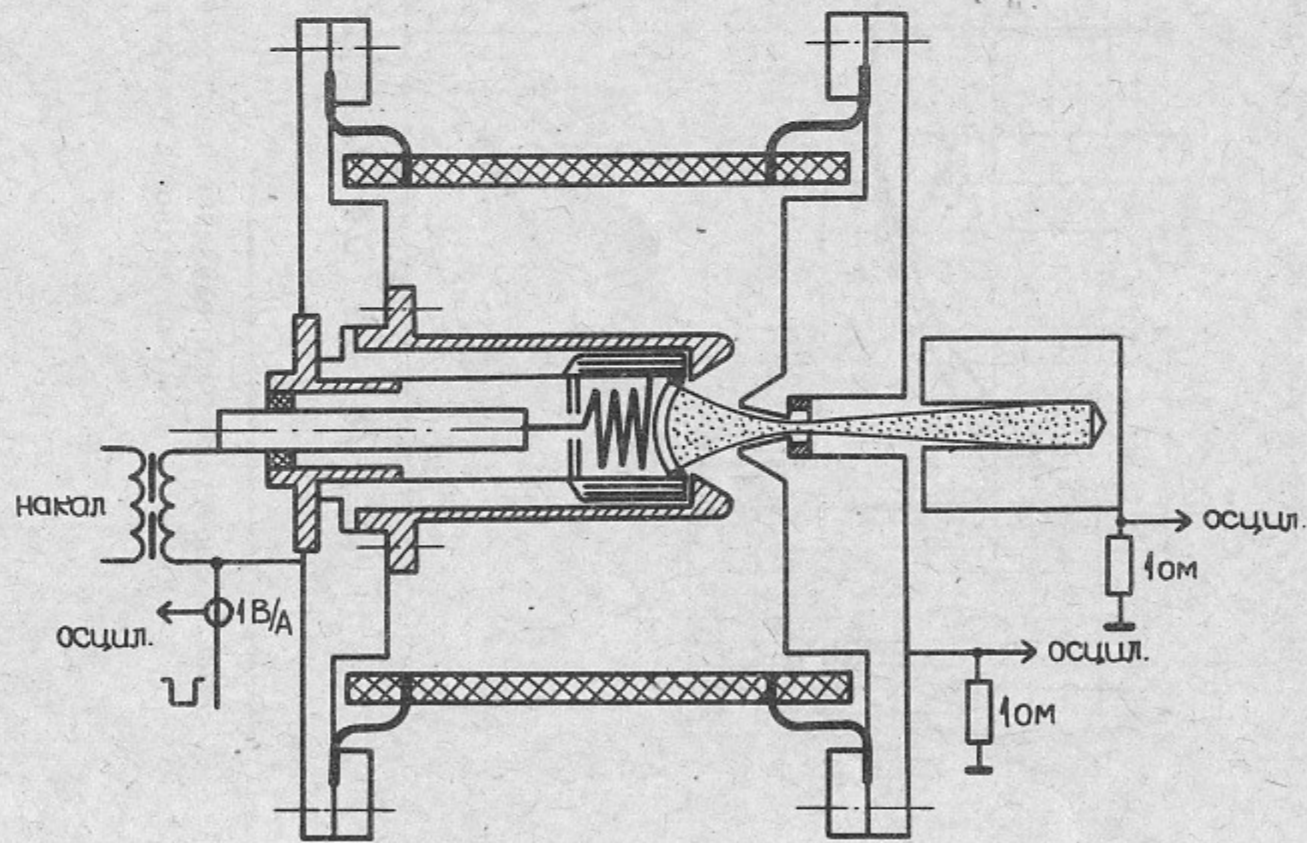


Рис. 11. Общий вид макета пушки и схема эксперимента.

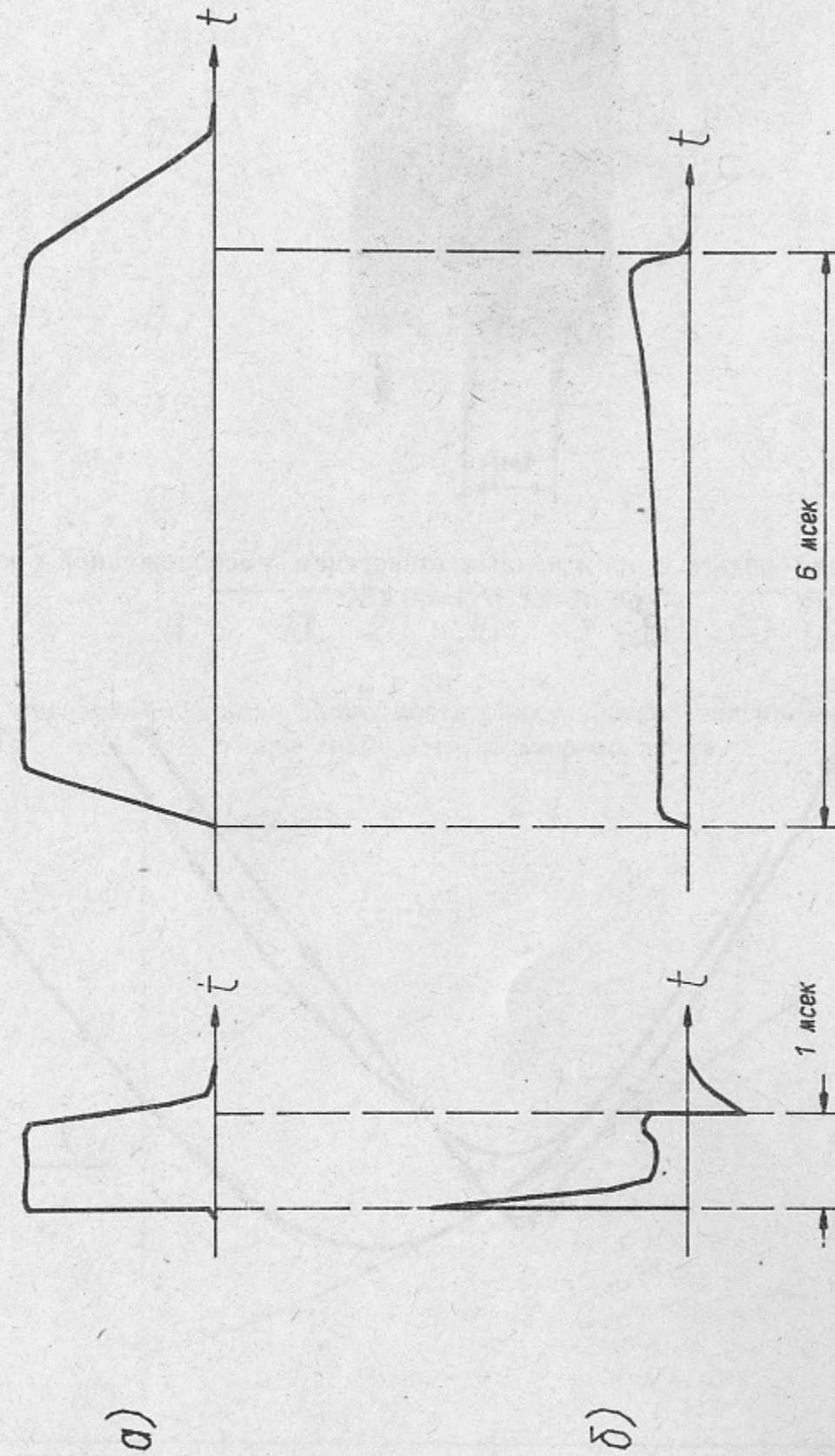


Рис. 12. Экспериментальные осциллограммы: а — напряжения на катоде; б — тока на анод при длительности импульса 1 и 6 мкс.



Рис. 13. Фотография фольги с прожженным отверстием, расположенной в кроссове-ре пучка ( $U=40$  кВ).

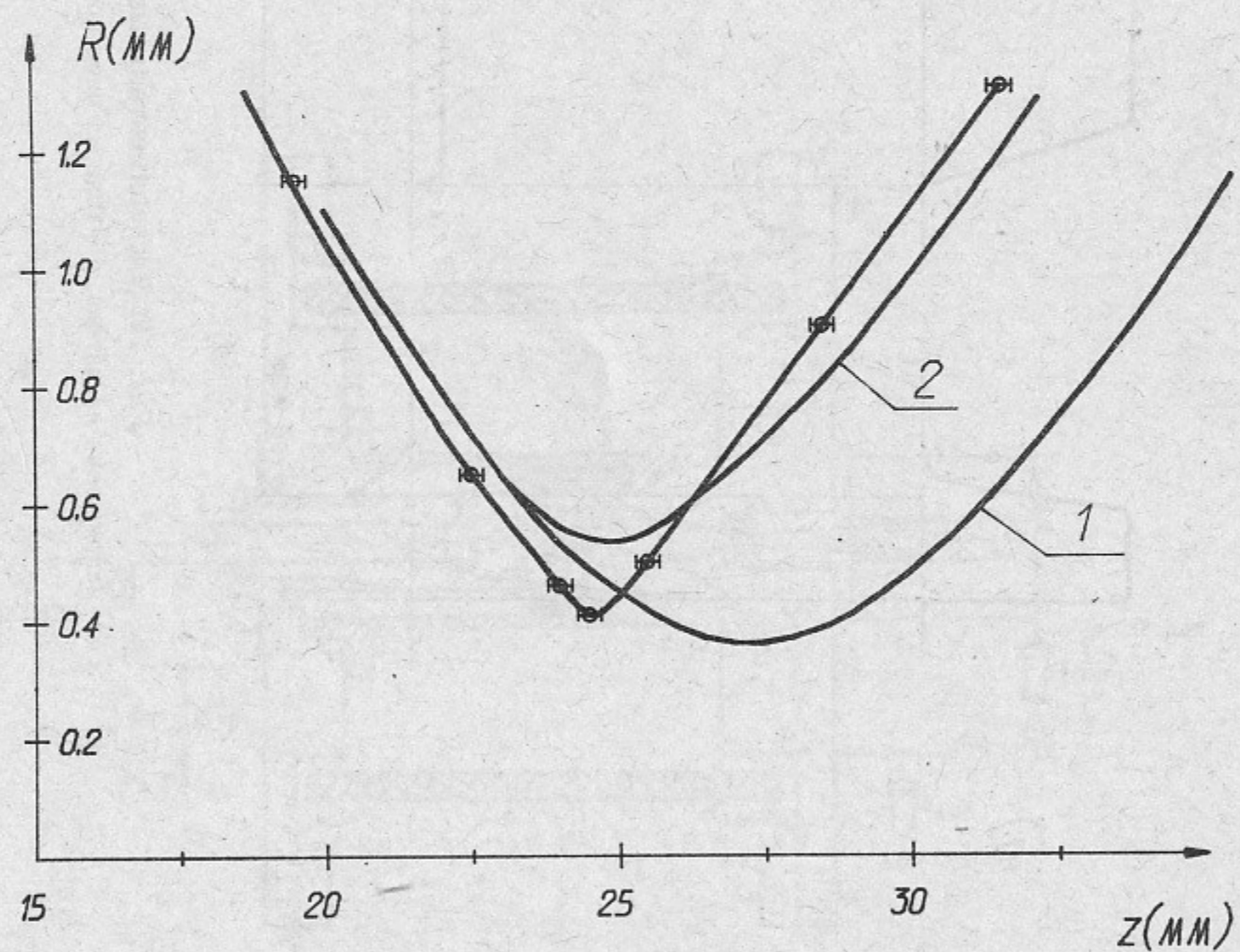


Рис. 14. Экспериментальная огибающая пучка при  $U=40$  кВ (точки) и расчетные огибающие для «теплого» ламинарного пучка (кривая 1—температура катода  $T_c=0.2$  эВ) и «теплого» пучка ( $T_c=2$  эВ) с кубической aberrацией углов сходимости (максимальный угол  $\alpha_{\max}=215$  мрад) (кривая 2).

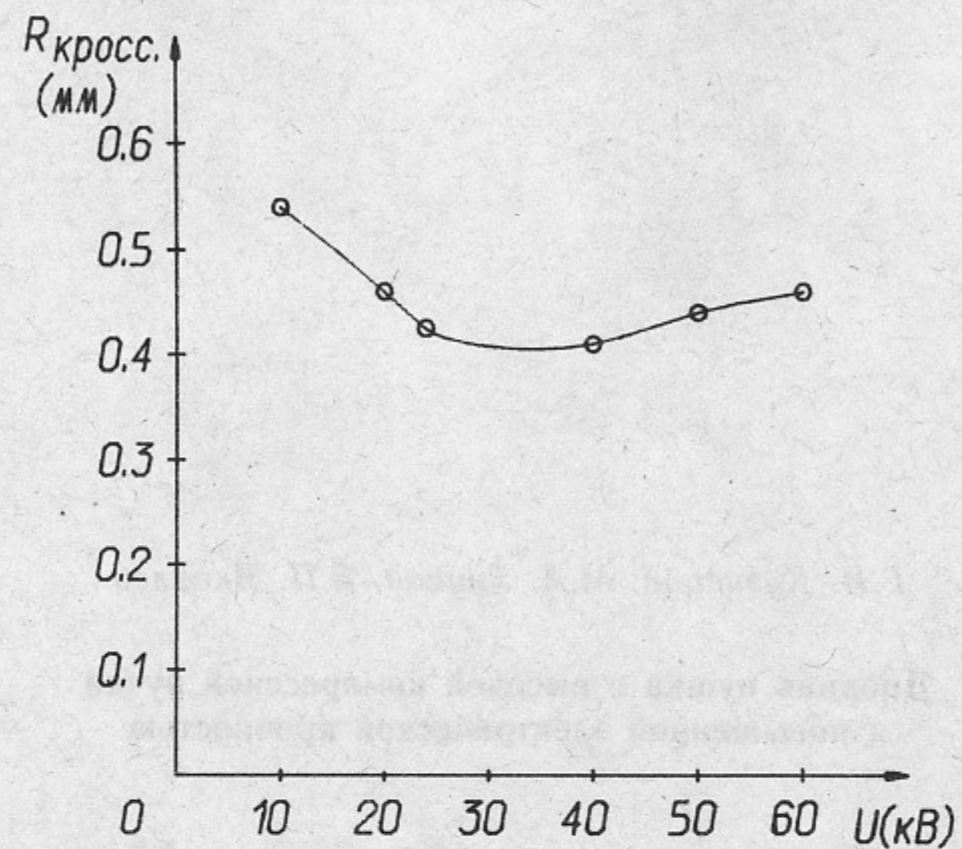


Рис. 15. Экспериментальная зависимость радиуса отверстия прожигаемого в фольге при  $z=24.5$  мм от энергии пучка.

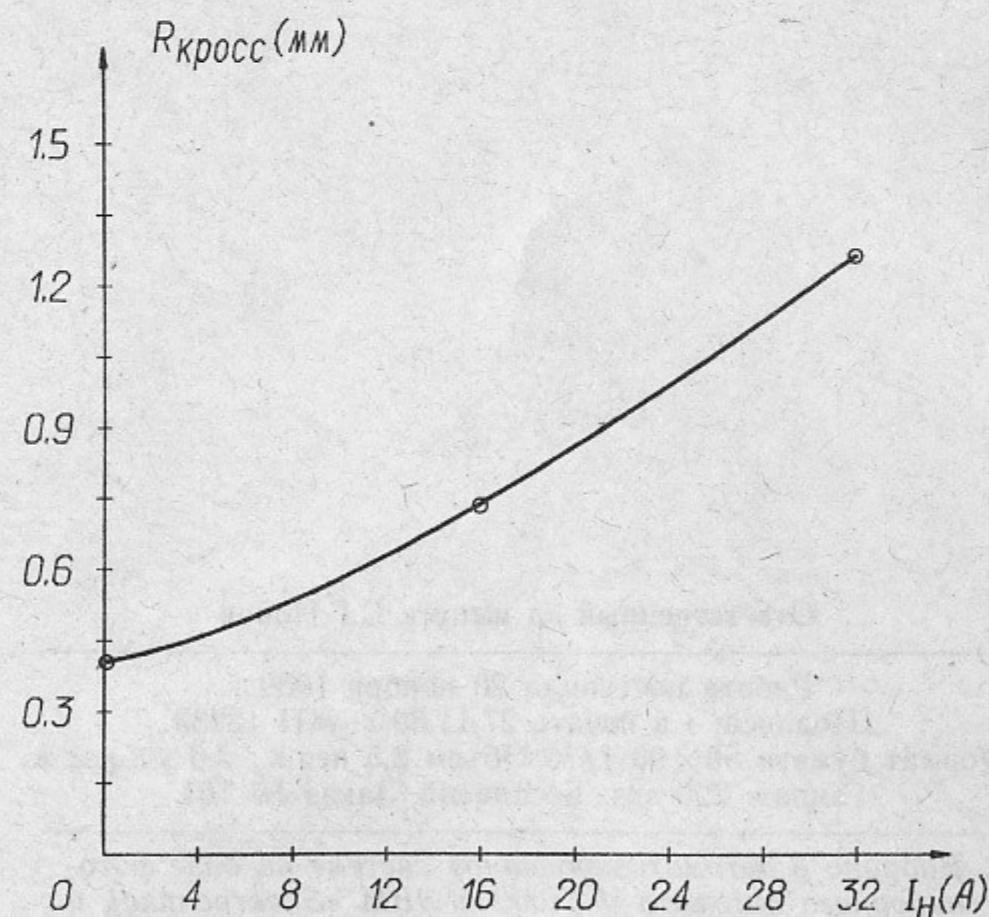


Рис. 16. Зависимость радиуса отверстия, прожигаемого пучком в фольге при  $z=24.5$  мм от тока накала катодного подогревателя, при напряжении на пучке  $U=40$  кВ.



*Г.И. Кузнецов, М.А. Тиунов, В.П. Яковлев*

**Диодная пушка с высокой компрессией пучка  
и повышенной электрической прочностью**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 20 ноября 1989 г.  
Подписана в печать 27.11.89 г. МН 12233  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,5 печ.л., 2,0 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 161

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*