

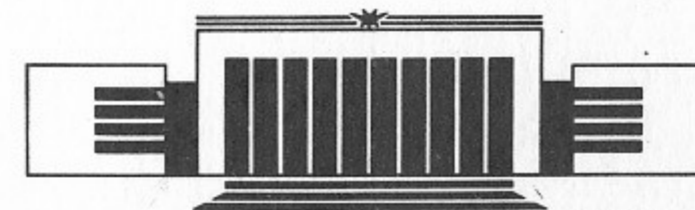


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

**А.Н. Белов, Е.В. Козырев, Г.И. Кузнецов,
О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко,
М.А. Тиунов, Б.С. Эстрин**

**ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ
ИМПУЛЬСНОГО МАГНИКОНА**

ПРЕПРИНТ 88-66



НОВОСИБИРСК

Источник электронов
импульсного магникона

*А.Н. Белов, Е.В. Козырев, Г.И. Кузнецов,
О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко,
М.А. Тиунов, Б.С. Эстрин*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

В работе описан источник электронов импульсного магникона — нового СВЧ-генератора с круговой разверткой пучка. Приведены конструктивные схемы действующего магникона 30-см диапазона волн и его источника электронов. Излагаются особенности конструкции источника, расчетов электронной пушки и динамики пучка. Приведены результаты экспериментального исследования источника электронов. Тщательная настройка и хорошая оптика пучка позволила достичь высоких параметров магникона. Источник электронов обеспечивает ток пучка 12 А при энергии 300 кэВ.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

В качестве одного из решений проблемы создания мощных источников СВЧ для питания ускоряющих систем современных накопителей в ИЯФ СО АН СССР предложен новый СВЧ-генератор с круговой разверткой пучка электронов, получивший название магникон [1].

Для проверки работоспособности прибора и отработки технических решений был создан и в 1985 году введен в действие первый магникон 30-см диапазона волн. Магникон предназначен для питания ускоряющей структуры разрезного микротрона на энергию 30 МэВ и ток 50 мА в импульсе 30-40 мкс [2]. Обеспечение таких параметров микротрона возможно при импульсной (частота повторения 1—2 Гц) мощности магникона 2—2.5 МВт.

Конструктивная схема магникона изображена на рис. 1. Электронный пучок формируется диодной пушкой 2 и, пройдя электроно-оптический канал 3, попадает в устройство круговой развертки 4, состоящее из двух резонаторов, помещенных в продольное магнитное поле. Магнитное поле сопровождения создается соленоидом, окруженным магнитным экраном, а величина его такова, что циклотронная частота в два раза превышает резонансную, т. е. частоту, на которую настроены резонаторы развертки. Направление поля сопровождения выбирается так, чтобы совпадали направления циклотронного вращения и вращения ВЧ-поля [3]. В устройстве развертки происходит отклонение частиц на угол $\alpha_0 \sim 30^\circ$. Затем после пролета (свободного от полей) пространства

дрейфа электроны попадают в выходной резонатор, также помещенный в продольное магнитное поле (распределение поля показано на рис. 1). При входе в это поле происходит преобразование продольной составляющей скорости частиц в поперечную вращательную, а степень преобразования характеризуется питч-углом α . Далее, двигаясь по спиральной траектории, электроны возбуждают в выходном резонаторе вращающуюся по азимуту волну (тип E_{110}) и отдают ей свою энергию, после чего попадают в коллекторную секцию 7. Коллекторная секция содержит плоский коллектор для развернутого и цилиндр Фарадея для прямого пучка. Кроме того, имеются пять перемещаемых в радиальном направлении пробников, с помощью которых измеряются характеристики пучка.

Мощность магнотрона при заданном значении электронного КПД (η_e) определяется энергией электронов и углом отклонения при развертке [4]. Например, для $\eta_e = 90\%$ и $\alpha_0 = 30^\circ$ мощность прибора будет составлять 2—2.5 МВт при энергии электронов 300—350 кэВ. Однако следует отметить, что приведенные в [4] оценки предельной мощности не учитывают ряд факторов таких, как фазовый объем, наличие и величина пульсаций огибающей пучка в устройстве развертки. Значительный фазовый объем пучка всегда приводит к уменьшению КПД или снижению мощности прибора. Это связано с разбросом питч-углов электронов и увеличением размера пучка на входе в выходной резонатор [4].

Размер пучка на входе в выходной резонатор определяется также пульсациями в устройстве развертки. Подбирая величину их в каждом конкретном случае можно добиться лучшей ситуации, чем для равновесного (бриллюэновского) пучка в устройстве развертки.

Учет перечисленных факторов в значительной степени определил круг проблем, которые необходимо было решить при проектировании источника электронов, и требования к его параметрам. Мощность пучка должна составлять 3—4 МВт при энергии электронов 250—300 кэВ (такой уровень напряжения обеспечивает высокий коэффициент усиления прибора [4] и достаточно прост при технической реализации) и минимальном фазовом объеме. Необходимо было также численное моделирование динамики пучка в магнитном поле устройства развертки и электронно-оптического канала. Кроме того, для нормальной работы микротрона должна обеспечиваться стабильность энергии около 1% в течение всей длительности импульса, что определяет требования к источнику высоковольтного питания.

В настоящей работе излагаются основные результаты численного моделирования, проектирования и экспериментального исследования источника электронов импульсного магнотрона.

• ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

Источник электронов содержит диодную электронную пушку, импульсный повышающий трансформатор, модулятор и электронно-оптическую систему, состоящую из электронно-оптического канала и магнитной системы устройства развертки. Для измерения параметров пучка используется коллекторная секция (см. рис. 1).

На рис. 2 изображена конструктивная схема источника электронов. Проходной изолятор 3 разделяет конструкцию на две части: вакуумную и газовую. В газовом объеме находятся импульсный трансформатор 2, трансформатор накала пушки 8 (находится под экраном) и эквивалент нагрузки 7. На фланцах газового бака 1 размещены изоляторы ввода питания первичной обмотки импульсного трансформатора и цепи накала катода. В вакуумном баке 5 находятся проходной высоковольтный изолятор, электростатический экран 4, электронная пушка 10 и подвижный анод 6. На боковых стенках бака имеются фланцы для установки магниторазрядных насосов и манометрического блока. Кроме того, имеются люки, через которые осуществляется смена катодного узла и его юстировка относительно анода.

Электронная пушка (рис. 3) импульсного магнотрона выполнена на базе катодных узлов ускорителей ИЛУ-2, ИЛУ-6 [5]. Стабильное положение эмиттера 4 из гексаборида лантана (LaB_6) во время разогрева системы обеспечивает специальная подвеска 3, закрепленная на фокусирующем электроде 6. Нагреватель 2 механически не связан с подвеской эмиттера и выполнен из вольфрамовой проволоки диаметром 0.8 мм. Такая конструкция обеспечивает стабильную оптику, но из-за худшей экранировки приводит к увеличению мощности, расходуемой на нагрев эмиттера.

Катодный узел имеет регулировки параллельного сдвига и наклона, позволяющие производить его юстировку относительно оси прибора. Для этого используется специальное устройство, устанавливаемое вместо анода.

Газовый бак рассчитан на избыточное давление 12 атм. В источнике электронов в качестве изолирующей среды используется

элегаз, находящийся под давлением 5 атм. Вторая функция газа — отвод тепла от теплонагруженных частей конструкции: катодного узла и импульсного трансформатора.

Проходной изолятор состоит из двух частей, расположенных в газовом и вакуумном объемах, соответственно. Прототипом вакуумного высоковольтного изолятора послужил разработанный Г.С. Крайновым изолятор электронного источника гироконя непрерывного генерирования для ВЭПП-4 [6], отличающийся уменьшенными габаритами и измененной конструкцией фланцев. Изолятор рассчитан на номинальное напряжение 300 кВ, рабочее давление газа 6 атм и выполнен из керамики 22ХС (диаметр колец 136 мм, количество колец 10, общая высота изолятора 280 мм). Газовая часть проходного изолятора выполнена из оргстекла. Внутри стенок изолятора имеются каналы, по которым пропускается трансформаторное масло для охлаждения фланца катодного узла пушки.

Импульсный трансформатор размещен в газовом баке (рис. 2), его Ф-образный неразрезной сердечник выполнен из ленточного железа Э360 сечением около 100 мм и имеет в плане круглую форму, хорошо вписывающуюся в конструктив бака. Трансформатор обеспечивает напряжение вторичной обмотки до 300 кВ в импульсе до 50 мкс с частотой повторения 1—3 Гц. Коэффициент трансформации 10.5. Вторичная обмотка содержит 470 витков провода ПОНП-0.2 и намотана двумя слоями. Это позволяет осуществлять питание подогревателя катода от внешнего источника переменного тока промышленной частоты ($U_{\max} = 500$ В, $I_{\max} = 1$ А). Понижающий накальный трансформатор находится под потенциалом катода.

Магнитная индукция в сердечнике импульсного трансформатора достигает 2.5 Т. Размагничивание сердечника осуществляется постоянным током в первичной обмотке (~ 20 А). Трансформатор сконструирован с повышенным запасом электрической прочности и нагружен помимо электронного пучка эквивалентом нагрузки для предотвращения перенапряжений при включениях без пучка.

Эквивалент нагрузки конструктивно оформлен в виде двух параллельно включенных блоков сопротивлений ТВО-10. Каждый блок содержит 22 резистора, а общее сопротивление эквивалента составляет 10 кОм. Эквивалент нагрузки размещен в высоковольтном зазоре газовой части проходного изолятора. Форма экранов, их радиусы закругления и зазоры между деталями конструкции подобраны так, чтобы напряженность электрического поля не пре-

вышала 100 кВ/см. Вся конструкция подвешена на кронштейнах, соединенных с электростатическими экранами изолятора. В эквиваленте нагрузки имеется низкоомное сопротивление для контроля формы сигнала вторичного напряжения импульсного трансформатора. В связи с тем, что резисторы ТВО обладают значительной ($\sim 10 \div 15\%$) нелинейностью и температурными уходами, уровень вторичного напряжения контролировался по величине первичного сигнала и коэффициенту трансформации. Наличие эквивалента нагрузки позволяет вести настройку источника без пучка при полном напряжении.

Электронно-оптический канал (рис. 2) служит для согласования оптики пучка с магнитной системой устройства развертки и для юстировки его положения относительно оси прибора. Канал содержит две одинаковые магнитные линзы длиной 60 мм и средним диаметром 140 мм. Каждая линза содержит 1100 витков, заключенных в магнитный экран, охлаждаемый водой. Между линзами находятся корректоры положения пучка (параллельного сдвига относительно оси) и корректоры угла наклона. Питание линз и корректоров осуществляется от источников постоянного тока. Индукция, создаваемая линзами, на оси достигает 300 Гс, а корректоры обеспечивают параллельный сдвиг 3.5 мм и угол отклонения 3° .

Модулятор (источник напряжения первичной обмотки импульсного трансформатора) собран по схеме частичного разряда накопительной емкости с коммутатором на вакуумном триоде ГМИ-47А (рис. 4). В анодной линии, волновое сопротивление которой $\rho_a = 10$ Ом, используются семь накопительных конденсаторов ИК-100-0.4. При этом отклонение импульса 50-мкс длительности от прямоугольного не превышает 1.5%.

Линия заряжается регулируемым высоковольтным выпрямителем до рабочего напряжения $E_a = 45 \div 50$ кВ и разряжается на нагрузку с эквивалентным сопротивлением $R_n = 100$ Ом.

Сетка модуляторной лампы подключена к сеточной линии (10 ячеек на основе конденсаторов К15-10). Рабочее напряжение сеточной линии $E_s = 8 \div 10$ кВ. Момент начала и окончания импульса модулятора определяется включением соответствующих тиратронов (типа ТГИ-1000/25) в сеточной цепи. Лампа ГМИ-47А работает в режиме, близком к насыщению, что обеспечивает слабую зависимость формы регулируемого напряжения от параметров сеточной цепи. В сеточной цепи лампы установлены нелинейные элементы, ограничивающие величину тока в системе при пробоях

высоковольтных вакуумных или газовых промежутков на уровне 200% номинального значения.

Импульсное напряжение отрицательной полярности с амплитудой $U_1 \sim 30$ кВ подается на повышающий импульсный трансформатор по высоковольтному кабелю КВИМ-60. Влияние намагничивающего тока трансформатора на форму импульса компенсируется неоднородностью анодной линии.

На рис. 5 изображен внешний вид газового бака, внутри которого размещен импульсный трансформатор, и вакуумного объема с электронной пушкой. Во время работы для защиты от ионизирующего излучения вся конструкция накрывается свинцовым колпаком (толщина стенок колпака 10 мм).

ДИНАМИКА ПУЧКА

Численное моделирование динамики пучка включало в себя два этапа. Расчет оптики электронной пушки и изучение динамики неразвернутого пучка в электронно-оптическом канале и магнитной системе устройства развертки.

Оптимизация геометрии прикатодных электродов пушки проводилась с применением комплекса программ SAM [7] и выбиралась по минимуму неоднородности эмиссии с катода и фазового объема пучка. В результате была разработана пушка, обеспечивающая неоднородность эмиссии с поверхности катода не более 3%, что достигается за счет пирсовского угла «заделки» как самого катодного узла, так и первого прикатодного электрода. Второй прикатодный электрод (7 на рис. 3) имеет угол меньше пирсовского, что позволяет слегка подфокусировать пучок в области анодного отверстия. Это необходимо для уменьшения aberrаций и рассеивающего действия анодной линзы.

Результаты расчетов пушки при напряжении 280 кВ и зазоре между анодом и катодом 67 мм приведены на рис. 6. Здесь же изображена принятая геометрия электродов, распределение электрического поля вдоль оси, эквипотенциали в области движения пучка, проведенные через 14 кВ, и расчетные траектории электронов. В правом верхнем углу рисунка показаны распределение плотности тока и его фазовый портрет на выходе из источника (14 см от катода).

В ходе расчетов было также найдено распределение напряжен-

ности электрического поля на поверхности электродов пушки. На рис. 7,а и б представлены кривые распределения электрического поля на поверхности второго прикатодного электрода (рис. 6, точки 1, 2, 3) и анода пушки (рис. 6, точки 4, 5, 6, 7). Максимальная напряженность поля при этом не превышает 150 кВ/см на аноде и 50 кВ/см на прикатодных электродах.

Кроме того, рассчитывалась зависимость первеанса пушки от зазора между анодом и катодом. Результаты расчета при напряжении 280 кВ приведены на рис. 8 (непрерывная кривая).

Для проведения пучка в пространстве за анодом и согласованного впуска его в магнитную систему устройства развертки используются две одинаковые магнитные линзы электронно-оптического канала. Геометрия линзы, расчетное и измеренное распределение магнитного поля вдоль ее оси изображено на рис. 9 (непрерывная и пунктирная кривые, соответственно). А на рис. 10 приведены геометрия и распределение магнитного поля в системе развертки при токе в обмотках соленоида 1000 А. Расчет магнитных полей как в линзах, так и в системе развертки выполнялся программой SAM.

По известным параметрам пучка на выходе из пушки и распределению магнитного поля за анодом была рассчитана динамика пучка вплоть до влета в выходной резонатор магнотрона (прямой пучок). Эти расчеты проводились также с использованием комплекса программ SAM без учета продольного электрического поля пучка. Для изучения поперечного движения частиц пучка использовалась квазиламинарная модель трубок тока [7], позволяющая корректно описывать неламинарные потоки.

В ходе экспериментального исследования источника электронов было отмечено, что на размер пучка после прохождения устройства развертки сильно влияет магнитное поле подогревателя катодного узла пушки. Дело в том, что в устройстве развертки специально формируется пульсирующий пучок, причем пульсации подбираются таким образом, чтобы при выходе из устройства развертки пучок сходился по радиусу. Как уже указывалось выше, это позволяет уменьшить его размер на входе в выходной резонатор, т. е. повысить мощность прибора и КПД.

В отсутствие магнитного поля на катоде пушки минимальный радиус пульсирующего пучка определяется его объемным зарядом и много меньше бриллюэновского. В результате, малые начальные aberrации в магнитных линзах электронно-оптического канала приводят к нарастающей неламинарности и все более сильному

искажению фазовой характеристики пучка после прохождения каждого узла пульсаций.

На рис. 11 представлены рассчитанные для этого случая форма огибающей пучка, распределение плотности тока и фазовый портрет пучка на расстоянии 200 мм от устройства развертки, т. е. на входе в выходной резонатор. Энергия электронов 285 кэВ при токе пучка 9.7 А, ток в обмотках магнитной системы устройства развертки 970 А. Такие параметры соответствовали одному из рабочих режимов магнотрона.

При наличии магнитного поля на катоде электроны приобретают на выходе из пушки некоторую начальную угловую скорость. В этом случае минимальный размер пульсирующего пучка начинает зависеть от величины этой скорости и при максимальном поле на катоде, которое соответствовало номинальной мощности накала и запуске пучка в пучности тока подогревателя (частота питания накала 50 Гц), уже сравним с бриллюэновским. Таким образом, магнитное поле подогревателя способствует устранению aberrаций, связанных с действием объемного заряда в узлах пульсаций. Результаты расчетов при максимальном токе подогревателя катода (35 А) представлены на рис. 12, а и б.

НАСТРОЙКА ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При запуске электронного источника были проведены испытания катодного узла пушки, конструкция которого обеспечивает стабильное положение катода (рис. 3) при нагреве. Однако, из-за худшей тепловой экранировки потребовалась большая мощность для поддержания рабочей температуры эмиттера. На рис. 13 представлена зависимость температуры катода от мощности, подводимой к накалу. Для сравнения на этом же рисунке изображена аналогичная зависимость для катодного узла ускорителя ИЛУ-6 [5]. Мощность в рабочем диапазоне температур ($T \sim 1550^\circ\text{C}$) составила около 300 Вт. Питание накала осуществлялось от стабилизированного источника переменного тока промышленной частоты 50 Гц.

Запуск и испытания высоковольтного модулятора, импульсного трансформатора и вакуумного изолятора проводились сначала без пучка на эквивалент нагрузки. Испытания модулятора показали, что в течение основной длительности импульса паразитная генера-

ция отсутствует. Это связано с тем, что модуляторная лампа (ГМИ-47А) работает в ключевом режиме. Установка же малоиндуктивных сопротивлений в анодной и сеточной цепях позволила устранить генерацию и на фронтах импульса в рабочем диапазоне напряжений. Было установлено также, что высоковольтное оборудование и узлы источника электронов в режиме микросекундных импульсов (до 5 мкс) позволяют развивать напряжение до 400 кВ на электронной пушке.

При первых включениях после разборки или напуска атмосферы необходима тренировка в течение нескольких минут при плавном увеличении напряжения. В дальнейшем тренировка не требуется.

При работе с электронным пучком для диагностики его параметров использовалась коллекторная секция (рис. 1), устройство которой схематично изображено на рис. 14. Секция содержит центральный коллектор 4 и диафрагму 3 с малым отверстием в центре, образующие цилиндр Фарадея при работе с прямолинейным пучком. Кроме того, имеется кольцевой коллектор 2 для приема развернутого пучка и пять пробников 1, расположенных в одной плоскости и перемещаемых в радиальном направлении шаговыми двигателями. Все приемники электронов изолированы от корпуса и выполнены из графита на медной охлаждаемой подложке. Пробники состоят из графитовой таблетки, также изолированной от корпуса и заключенной в молибденовый кожух толщиной 1 мм с отверстием для прохождения электронов. Размер отверстия в радиальном направлении 1 мм, в азимутальном — 6 мм.

Для исследования прямого пучка коллекторная секция присоединялась непосредственно к электронно-оптическому каналу. В такой схеме исследовалась зависимость первеанса пушки от зазора между анодом и катодом (рис. 8, точки). На рис. 15 приведены осциллограммы импульсов напряжения на электронной пушке и тока пучка ($U_n = 300$ кВ, $I_n = 11.3$ А).

Затем к электронно-оптическому каналу присоединялось устройство развертки, а коллекторная секция устанавливалась на его выходе. В такой схеме плоскость пробников коллекторной секции соответствует месту входа пучка в выходной резонатор. Таким образом, снимая пробниками распределение плотности тока пучка можно определить его поперечный размер, а воздействуя на параметры электронно-оптического канала и изменяя магнитное поле в системе развертки, можно оптимизировать этот размер.

Управление установкой и контроль параметров автоматизиро-

ваны, что позволяет быстро проводить исследование функциональных зависимостей и оптимизацию режима работы. Основные источники питания обеспечивают стабильность на уровне 0.1-0.5%, а временное разрешение измерительной аппаратуры составляет около 100 нс.

Как уже говорилось выше, при настройке источника выяснилось, что на оптику пучка заметно влияет магнитное поле подогревателя катода. Малая длительность импульса тока пучка (50 мкс) позволяет, если менять время запуска относительно периода сети накала, формировать пучок в различном магнитном поле подогревателя. Эти эксперименты были проделаны, и оказалось, что наименьший размер на пробниках пучок имеет, если он рождается в максимальном магнитном поле. На рис. 16 показана зависимость радиального размера развернутого по кругу пучка, снятая пробниками, от фазы сети питания накала в момент запуска источника электронов. Максимальный размер соответствует отсутствию поля подогревателя (ноль фазы), а минимальный — максимуму поля (90°).

Далее настройка оптики проводилась путем выбора надлежащего режима работы магнитных линз и корректоров электронно-оптического канала, а также пульсаций в магнитном поле устройства развертки (подбор тока в обмотках соленоида). В результате удалось получить размер пучка около 9.5 мм по уровню 0.5 при энергии электронов 300 кэВ и токе пучка 12 А. Такой же размер получается для непульсирующего бриллюэновского пучка, но при токе только 7 А [4].

На рис. 17 показано распределение плотности тока и размер развернутого пучка, снятый пробниками коллекторной секции при энергии электронов 285 кэВ и токе 9.7 А.

Тщательная настройка источника электронов и хорошая оптика пучка позволили достичь на магникоме рекордного КПД. Основные параметры действующего магникона приведены в таблице.

Энергия электронов, кэВ	300
Ток пучка, А	12
Мощность пучка, МВт	3.6
Длительность импульса пучка, мкс	50
Частота повторения, имп/с	1-2
Рабочая частота магникона, МГц	915
Выходная мощность, МВт	2.6
КПД, %	73
Коэффициент усиления, дБ	31

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. 1110335 (СССР). Электронный прибор СВЧ-магникон/Карлинер М.М., Козырев Е.В., Максимов А.Ю., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н.—Б.И., 1986, № 4, с.281.
2. Акимов В.Е., Вечеславова Т.Е., Винокуров Н.А. и др. Состояние работ по созданию разрезного микротрона в ИЯФ СО АН СССР.—В кн.: Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1986).—Дубна, 1987, т.2, с.113—116.
3. Карлинер М.М., Козырев Е.В., Макаров И.Г. и др. Круговая СВЧ-развертка пучка частиц с магнитным сопровождением.—Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-143. Новосибирск, 1983, 24 с.
4. Карлинер М.М., Козырев Е.В., Максимов А.Ю., Нежевенко О.А. Приближенная теория магникона.—Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-64. Новосибирск, 1987, 41 с.
5. Ауслендер В.Л., Лившиц А.А., Панфилов А.Д. и др. Ускоритель типа ИЛУ для промышленных целей.—В кн.: Доклады четвертого Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, Л., 1982, т.1, с.25—31.
6. Гапонов В.А., Нехаев В.Е., Теряев В.Е. Исследование электрической прочности большого вакуумного промежутка с анодной сеткой.—ЖТФ, 1977, т.47, вып.2, с.410—415.
7. Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. SAM—интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ.—Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-35. Новосибирск, 1987, 63 с.

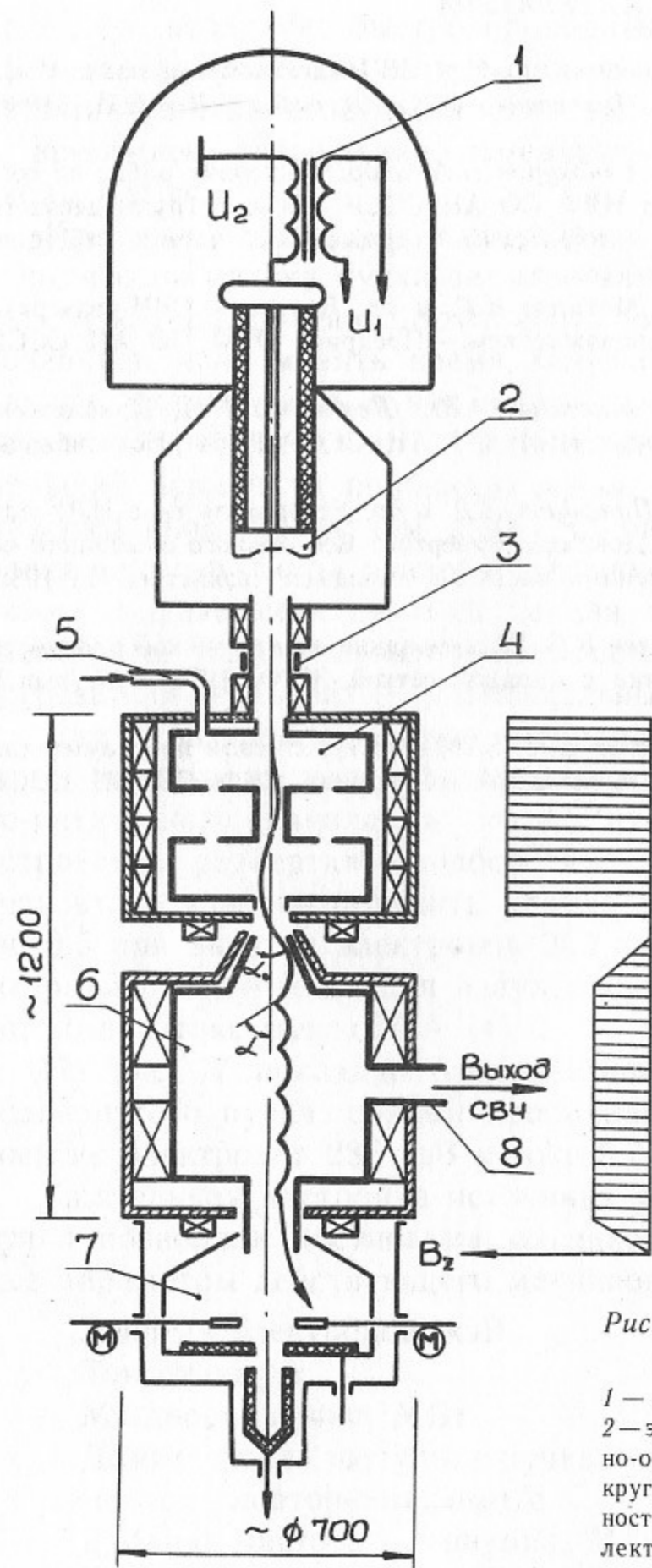


Рис. 1. Конструктивная схема магнетрона:

1 — импульсный трансформатор; 2 — электронная пушка; 3 — электро-но-оптический канал; 4 — устройство круговой развертки; 5 — ввод ВЧ-мощности; 6 — выходной резонатор; 7 — коллекторная секция; 8 — волноводный вывод ВЧ-мощности.

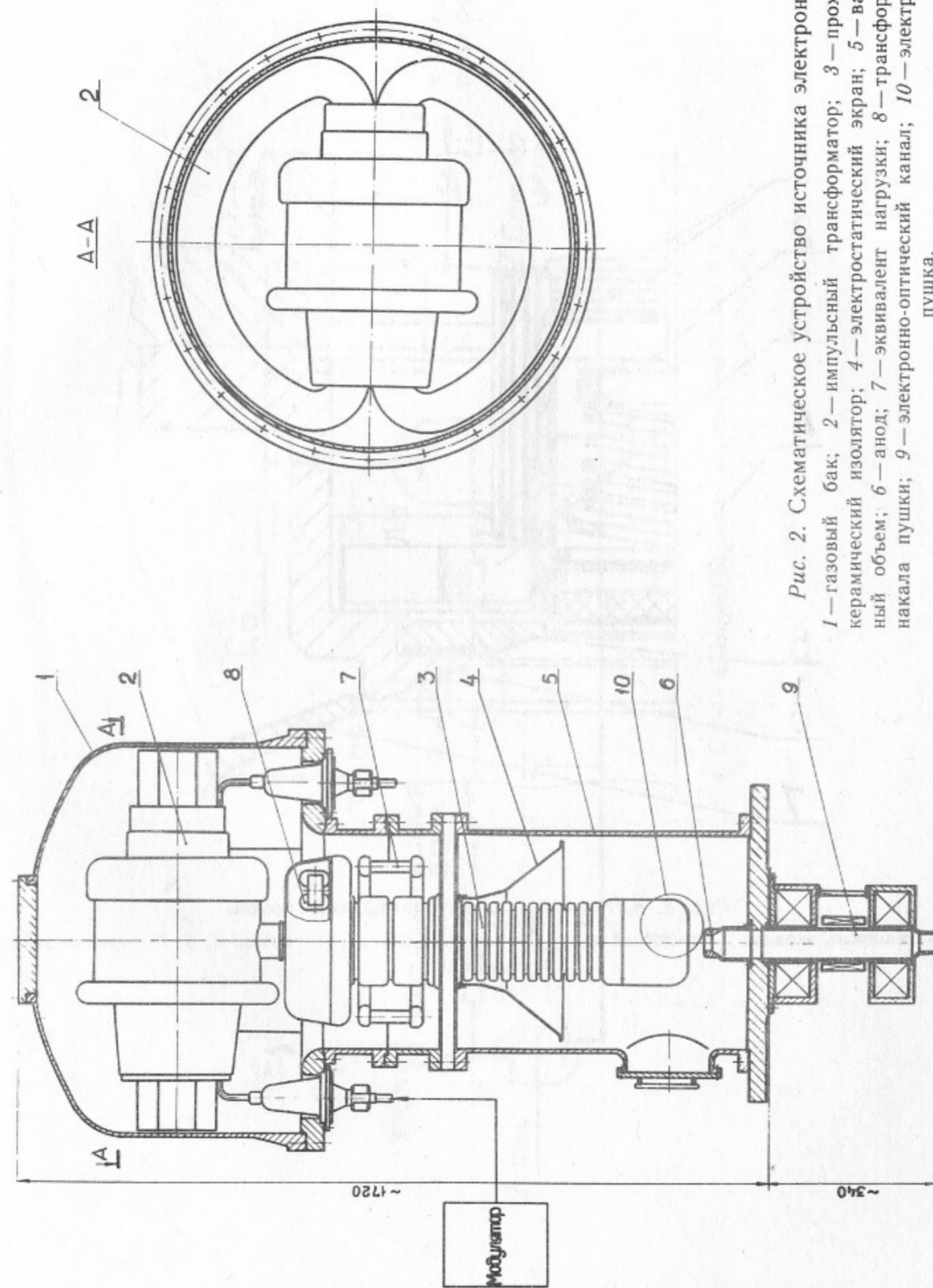


Рис. 2. Схематическое устройство источника электронов:
1 — газовый бак; 2 — импульсный трансформатор; 3 — проходной керамический изолятор; 4 — электростатический экран; 5 — вакуумный объем; 6 — анод; 7 — эквивалент нагрузки; 8 — трансформатор накала пушки; 9 — электро-но-оптический канал; 10 — электронная пушка.

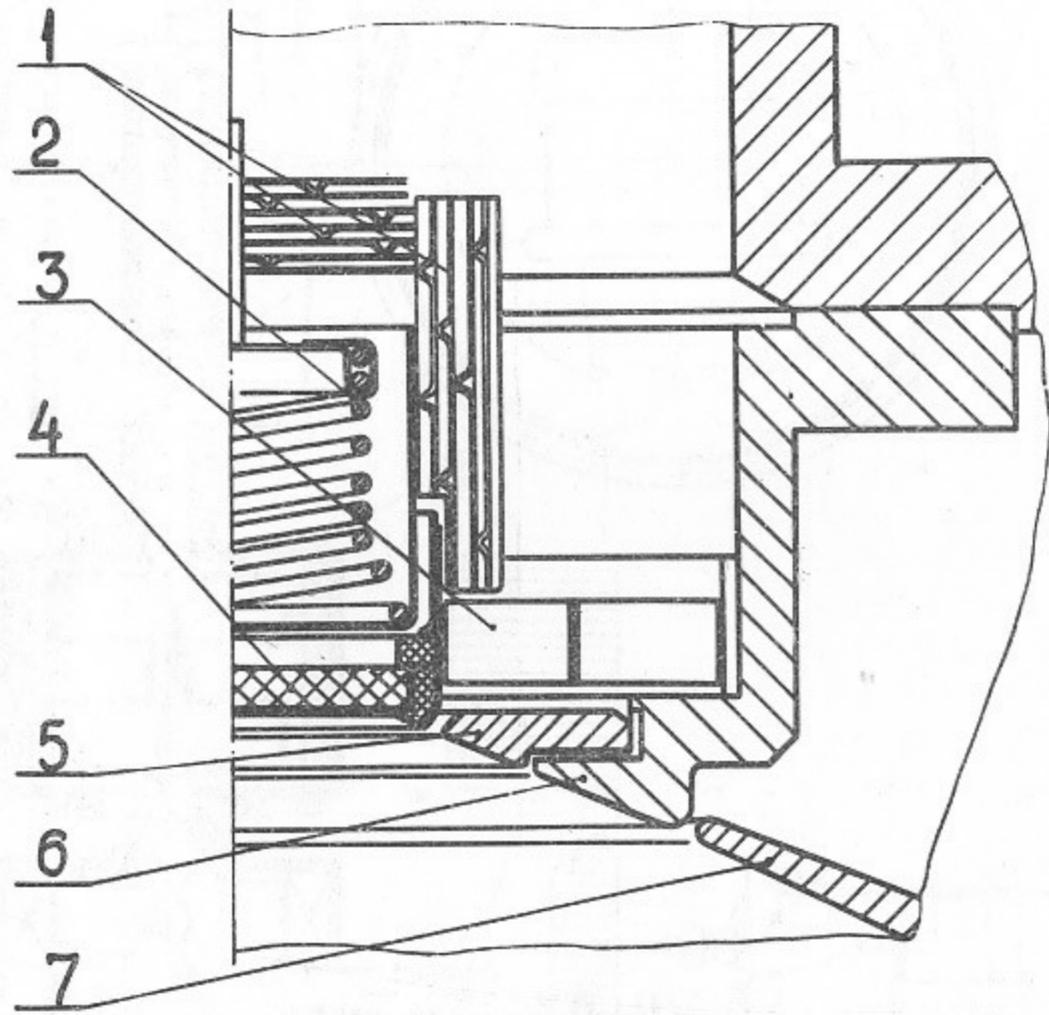


Рис. 3. Катодный узел источника электронов.

1 — тепловые экраны; 2 — подогреватель; 3 — подвеска катода; 4 — катод; 5, 6, 7 — прикатодные электроды.

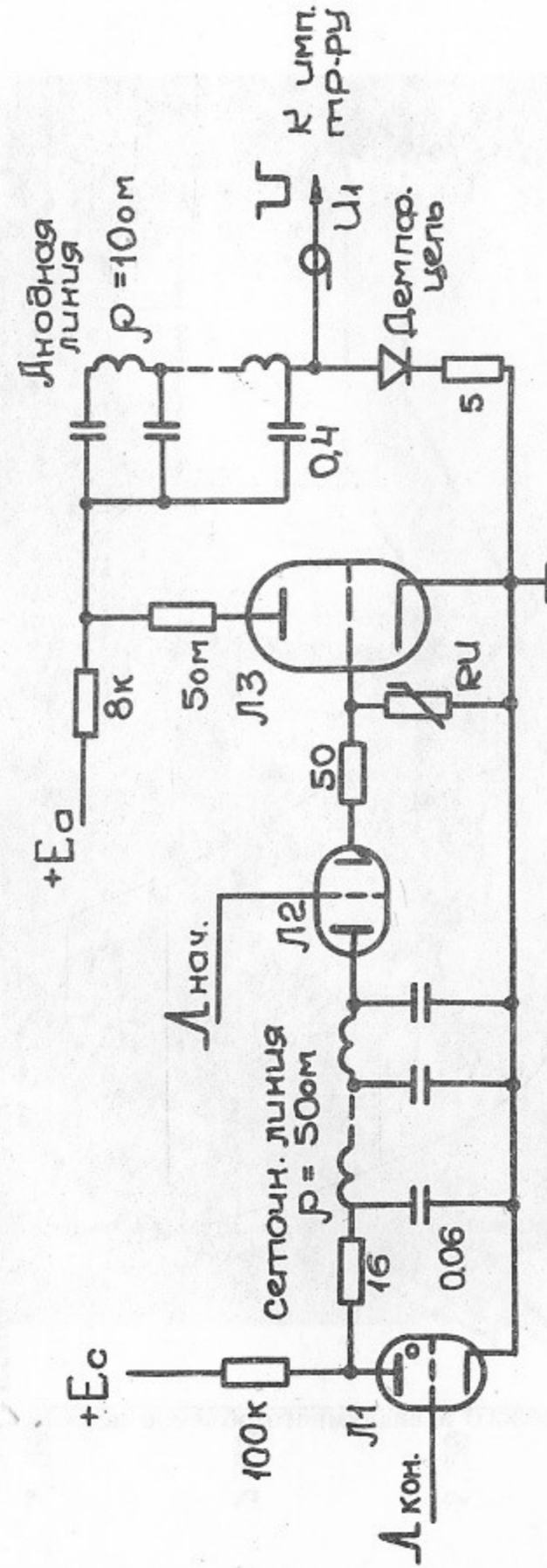


Рис. 4. Схема высоковольтного модулятора.

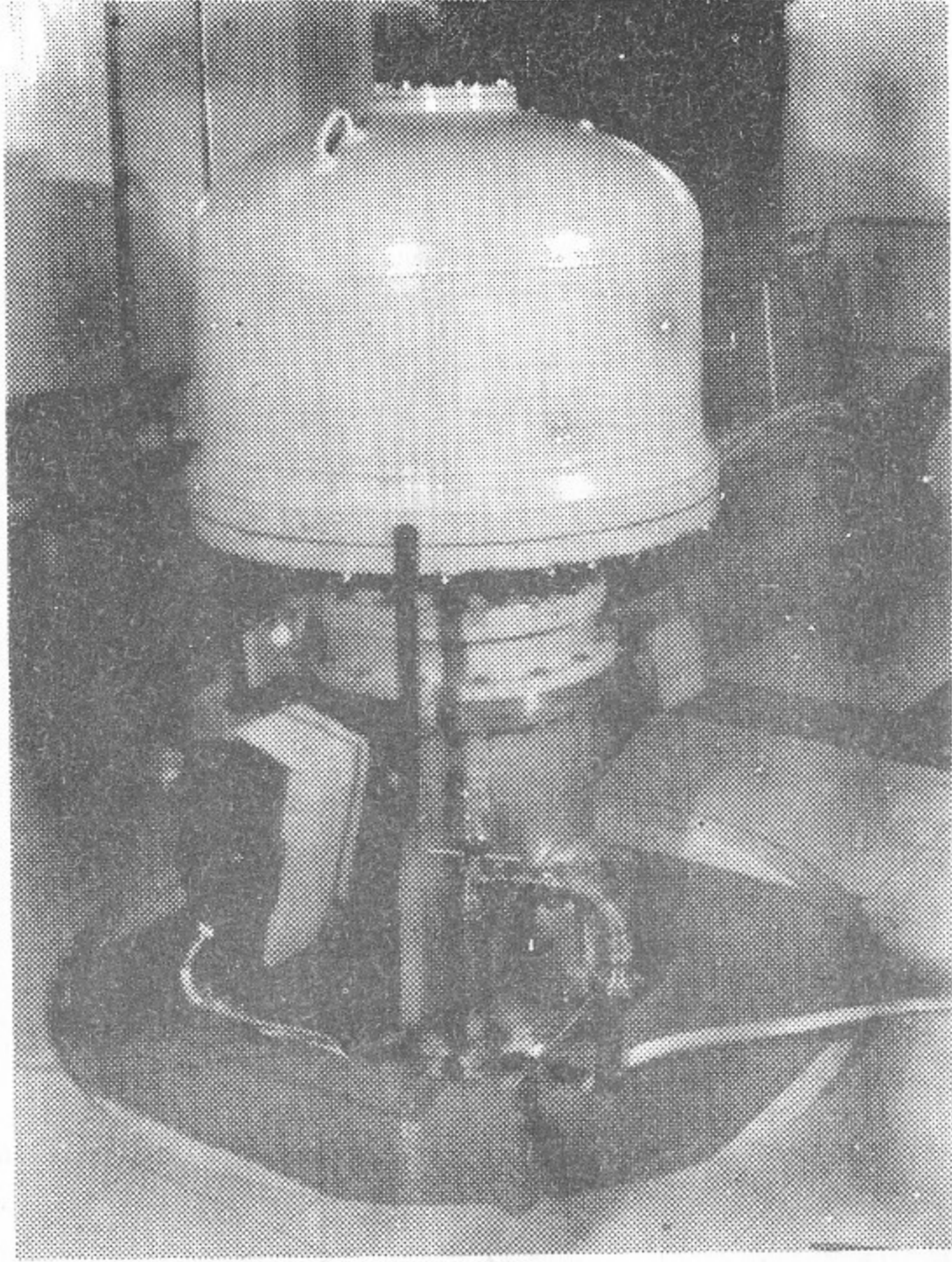


Рис. 5. Внешний вид газового и вакуумного объемов источника электронов.

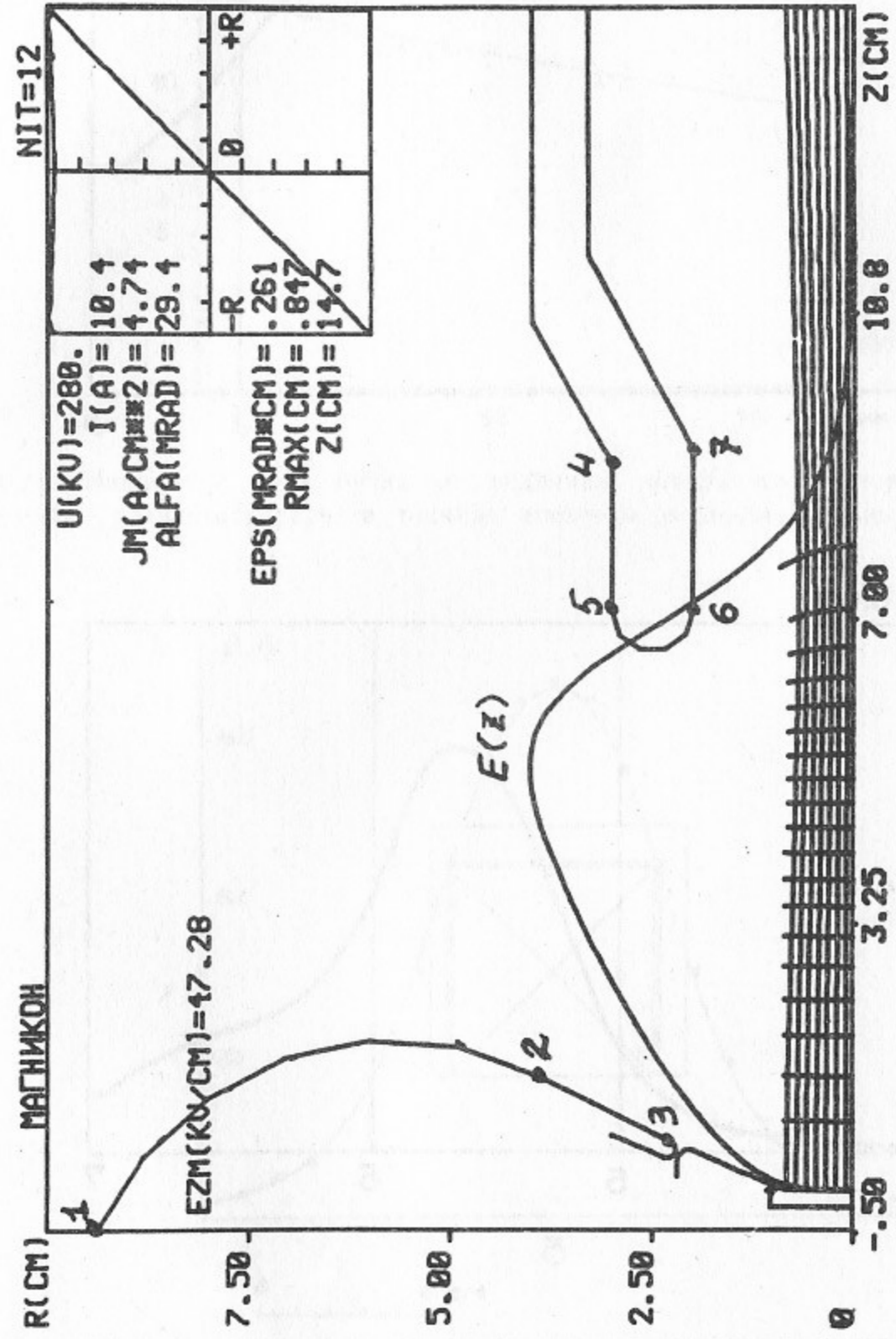
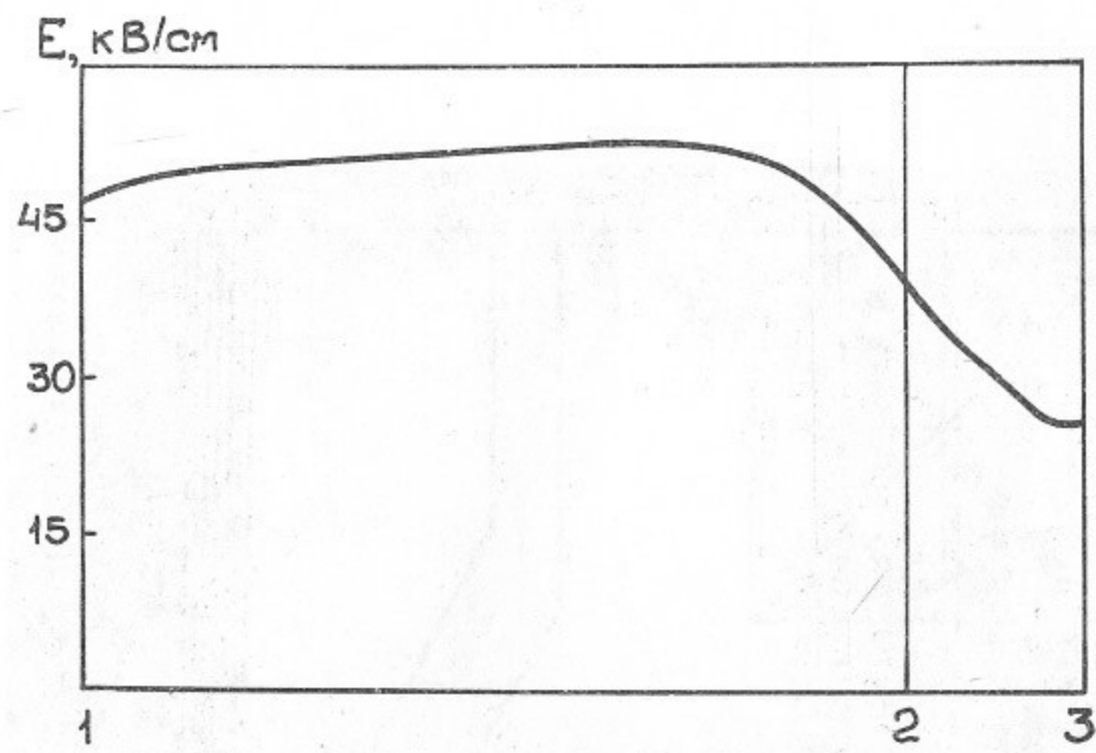
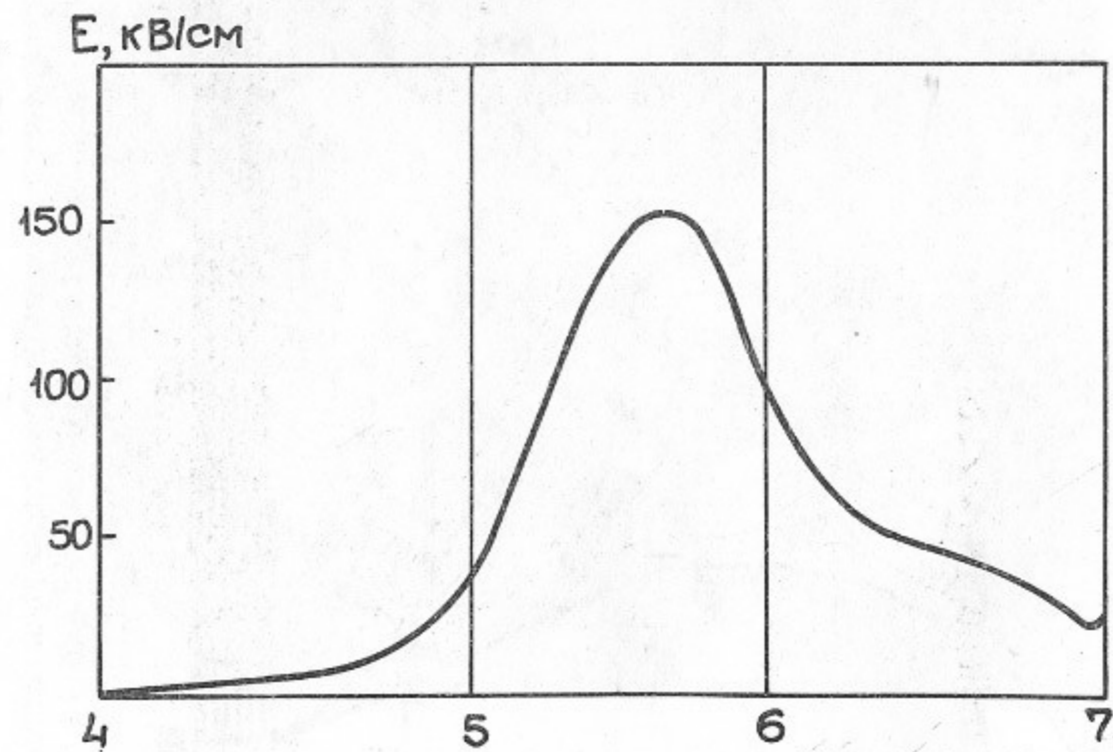


Рис. 6. Геометрия и результаты расчета электронной пушки. В правом верхнем углу — распределение плотности тока и фазовый портрет пучка на расстоянии 14.5 см от катода.



а



б

Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля на прикатодных электродах (а) и аноде (б) электронной пушки.

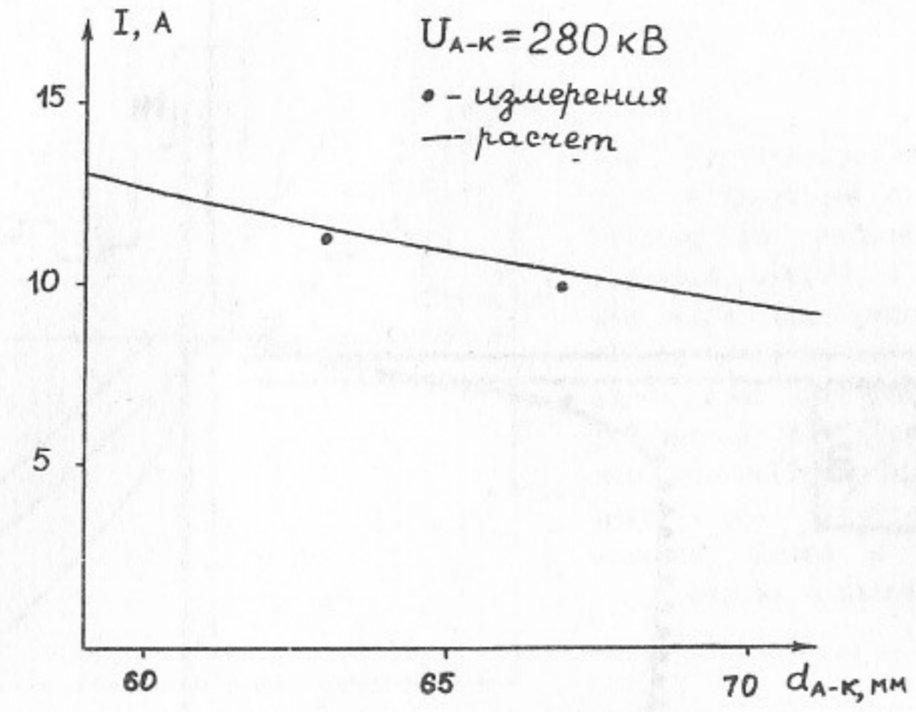


Рис. 8. Изменение тока пучка от величины зазора анод-катод. Непрерывная кривая — результаты расчета, точками отмечены экспериментальные результаты.

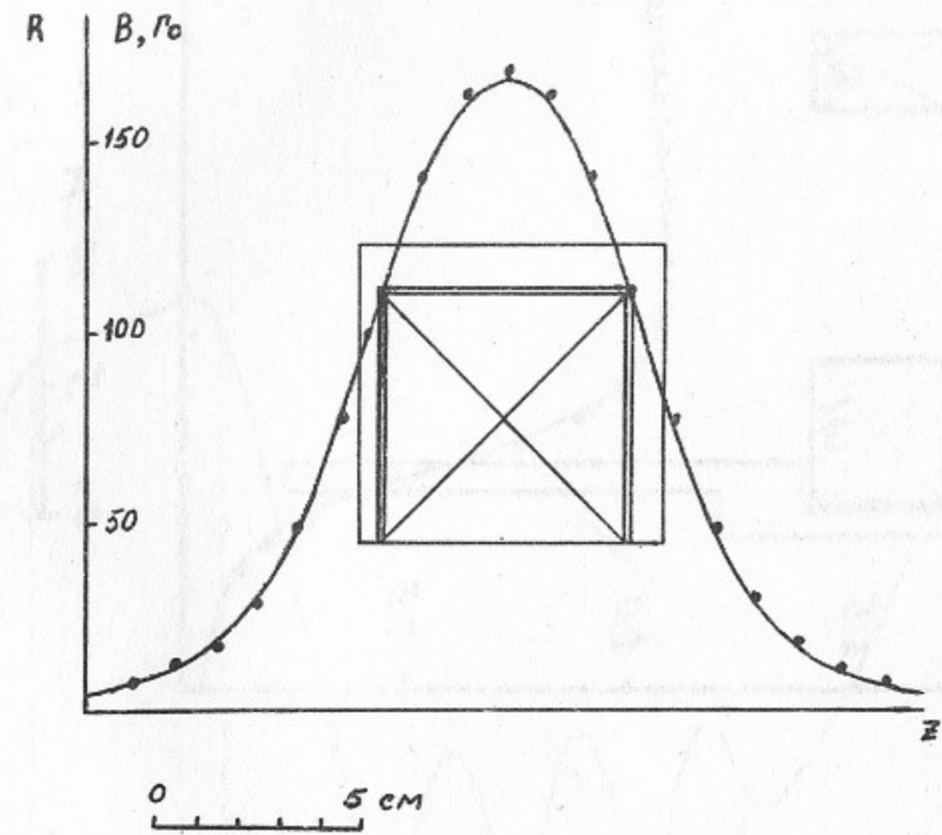


Рис. 9. Геометрия магнитной линзы, измеренное и расчетное распределение поля на оси (точки и непрерывная линия, соответственно).

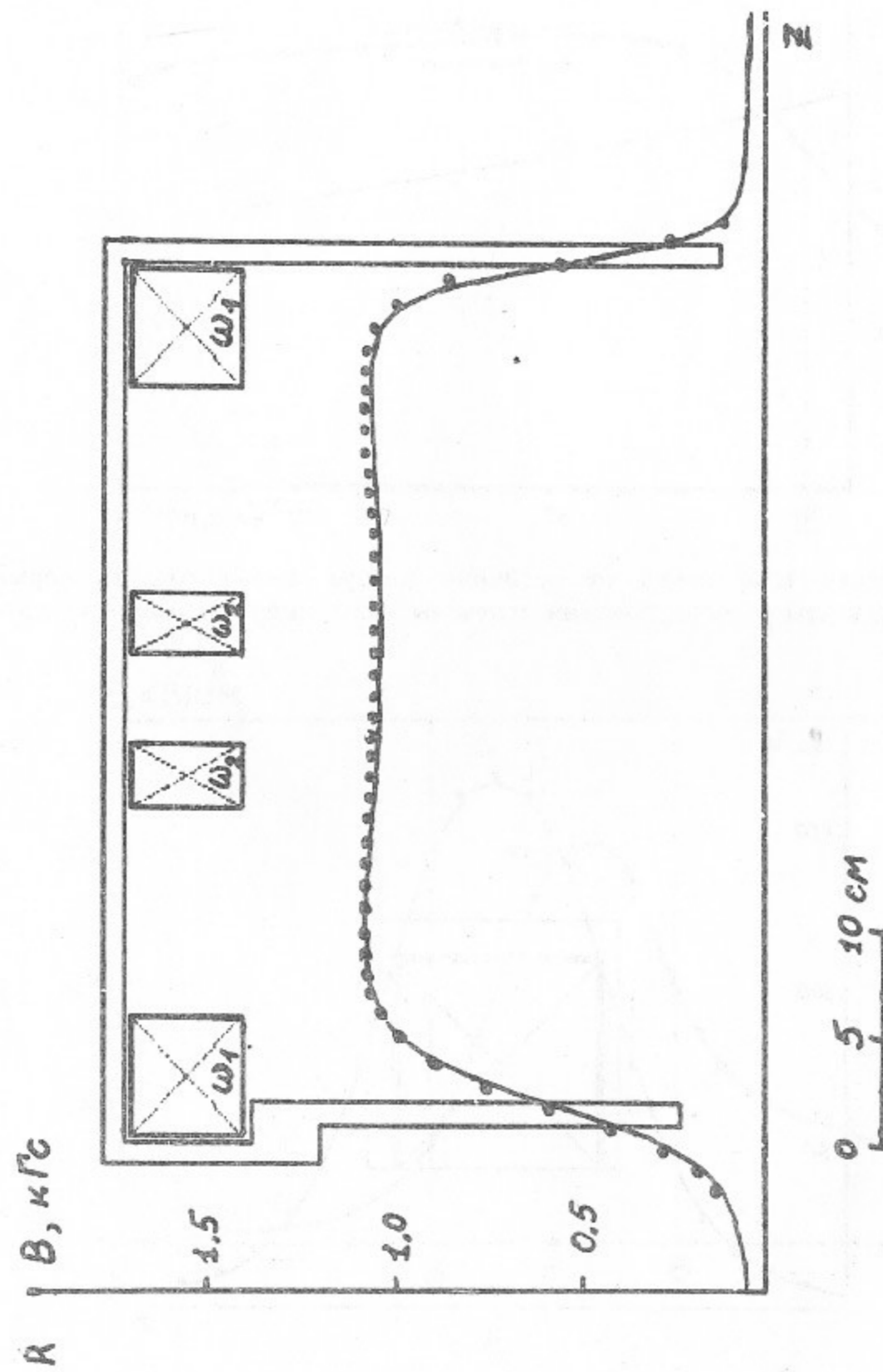


Рис. 10. Распределение магнитного поля в системе развертки. Точками отмечены результаты измерений (ток в катушках 1 кА, число витков $\omega_1 = 12$, $\omega_2 = 6$).

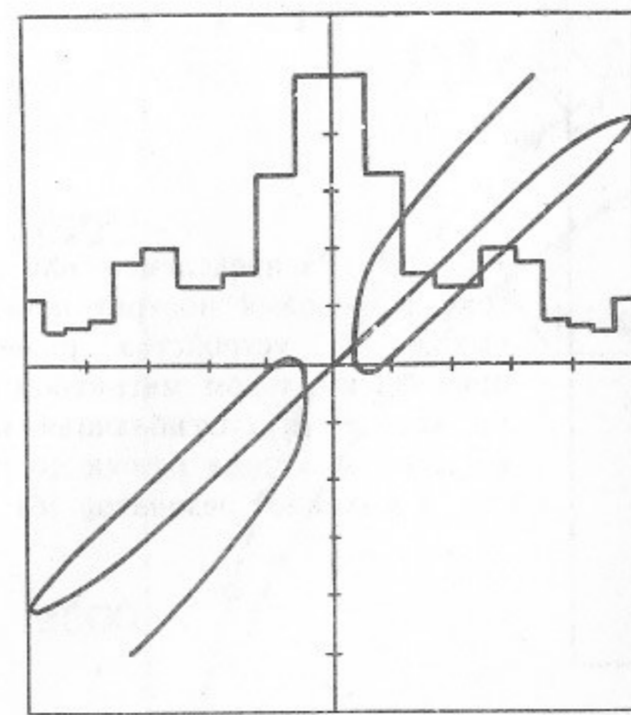
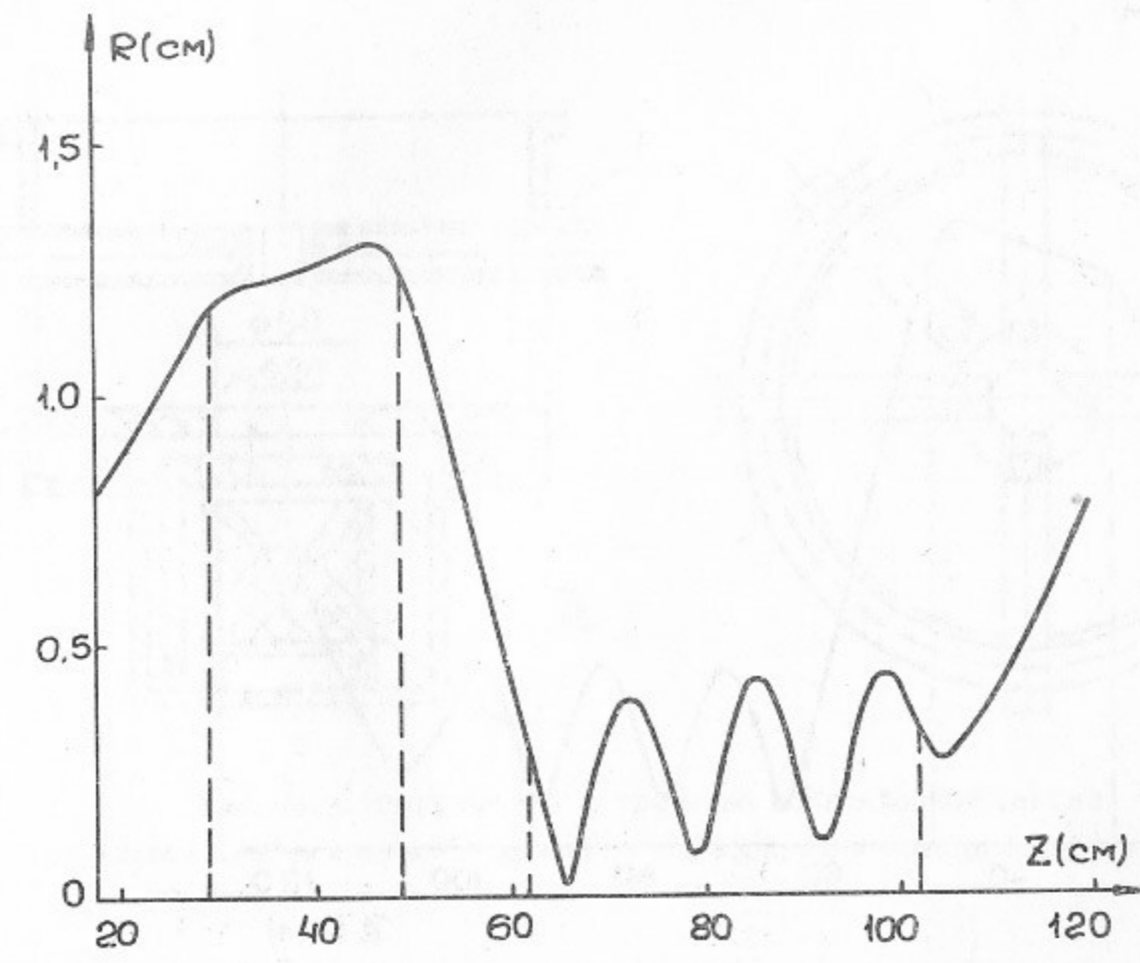


Рис. 11. Распределение плотности тока и фазовый портрет пучка на выходе из устройства развертки (прямой пучок) в случае отсутствия магнитного поля на катоде (а). Огибающая пучка на пути от катода пушки до входа в выходной резонатор (б). Пунктирными линиями обозначены плоскости магнитных линз электронно-оптического канала, входа в устройство развертки и выхода из него.

d)

$U_A = 285 \text{ кВ}$, $I_n = 9.65 \text{ А}$, $z = 120 \text{ см}$, $R_n = 0.78 \text{ см}$
 $J_{\text{max}} (\text{А/см}^2) = 18.75$, $\epsilon (\text{мрад} \cdot \text{см}) = 12.21$
 $\alpha_{\text{max}} (\text{мрад}) = 53.14$.



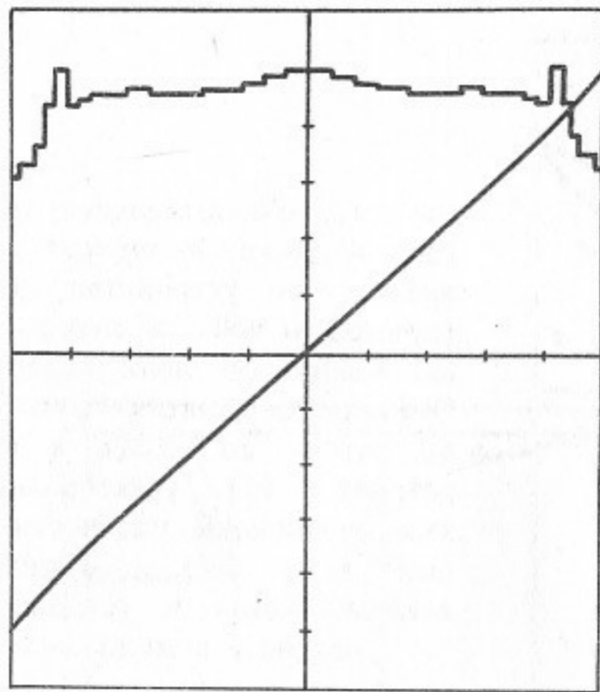


Рис. 12. Распределение плотности тока и фазовый портрет пучка на выходе из устройства развертки при максимальном магнитном поле на катоде (а). Огибающая пучка на пути от катода пушки до входа в выходной резонатор (б).

а)

$U_A = 285 \text{ кВ}$, $I_n = 9,65 \text{ А}$, $Z = 94,313 \text{ см}$, $R_n = 0,66 \text{ см}$
 $j_{\text{max}} (\text{А/см}^2) = 21,9$, $\epsilon (\text{мрад} \cdot \text{см}) = 1,072$,
 $\alpha_{\text{max}} (\text{мрад}) = 55,43$.

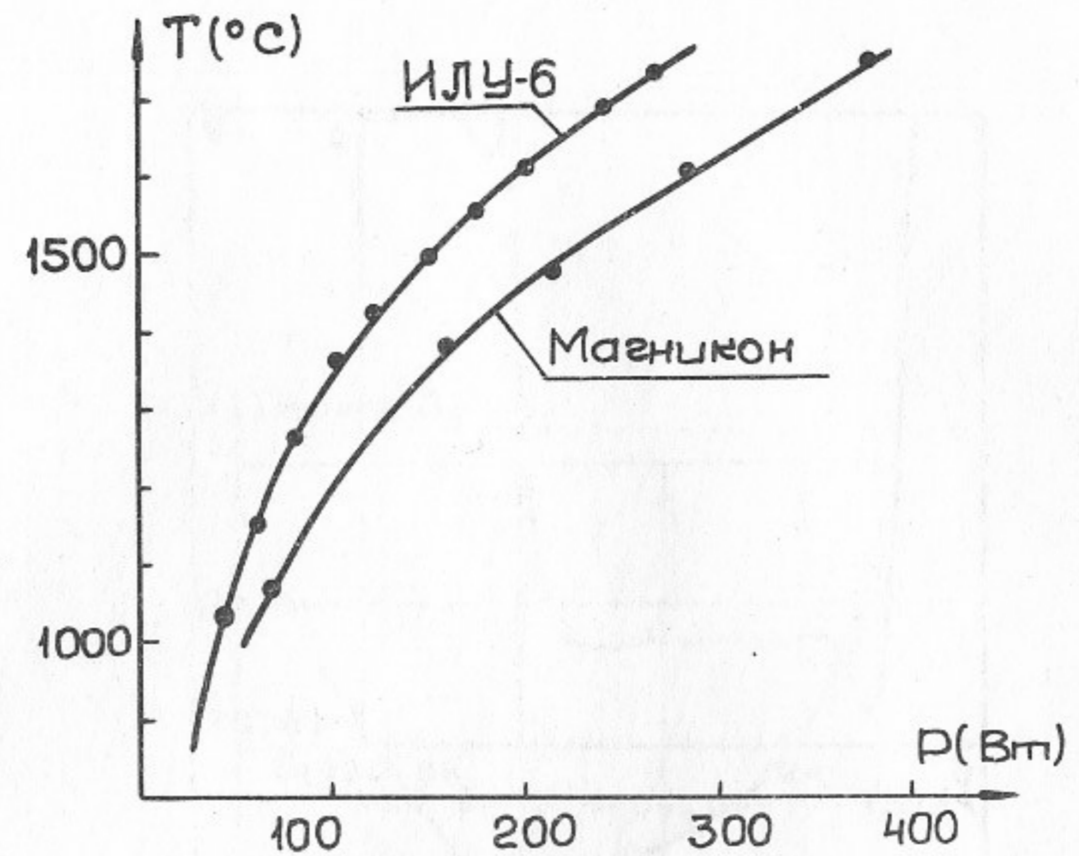
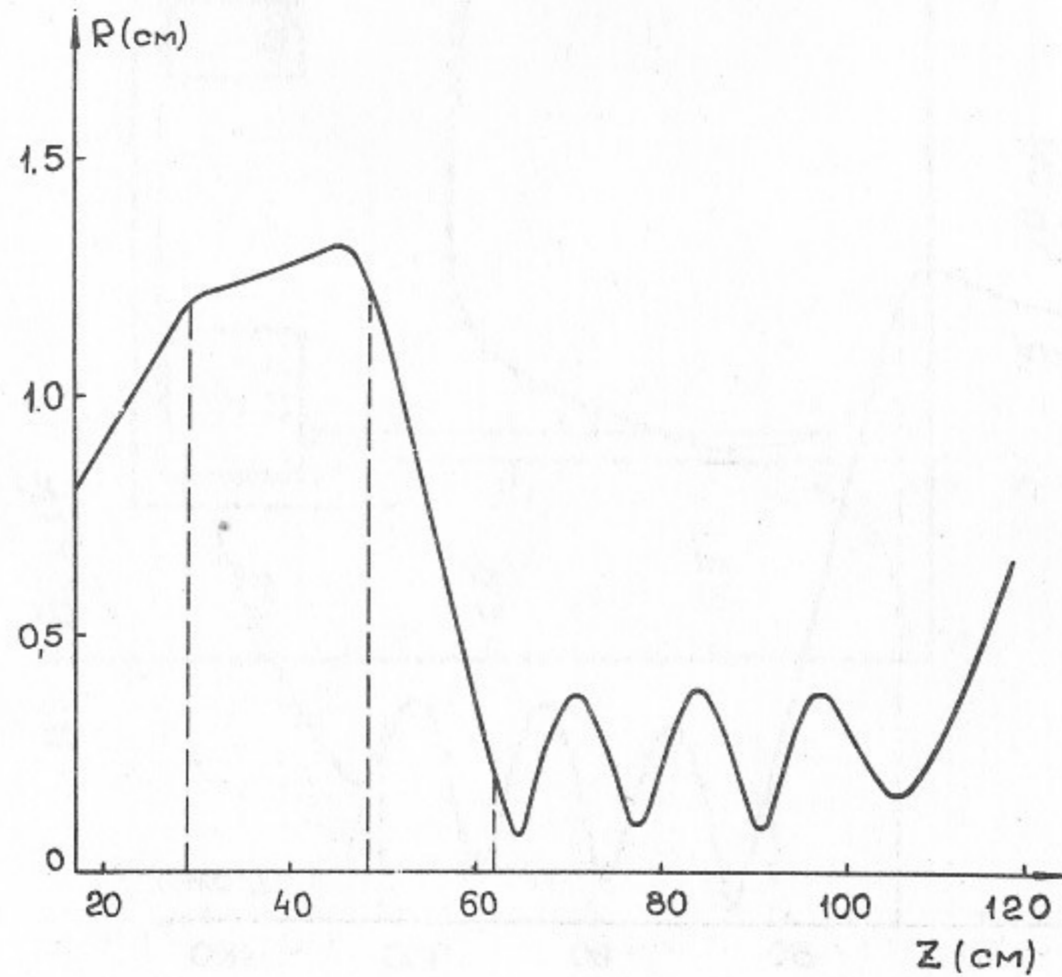


Рис. 13. Зависимость температуры эмиттера от мощности, подводимой к накалу электронной пушки.

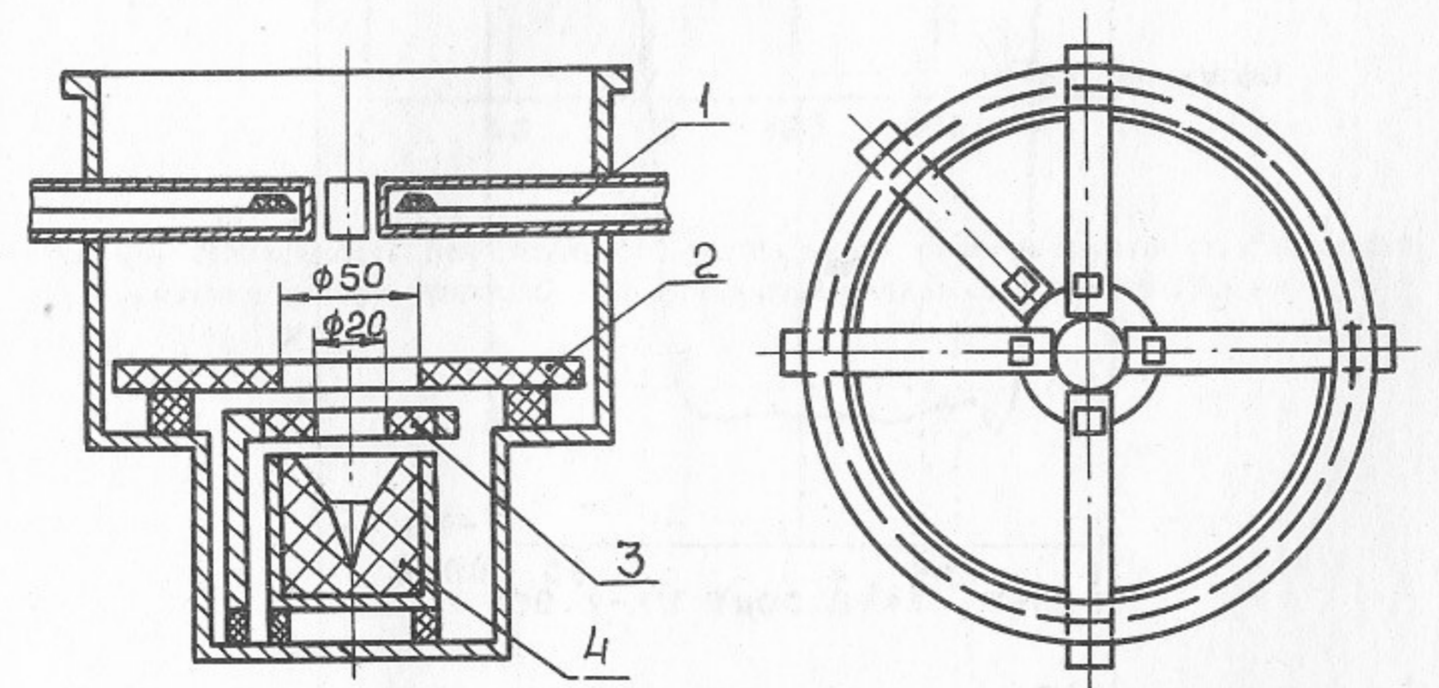
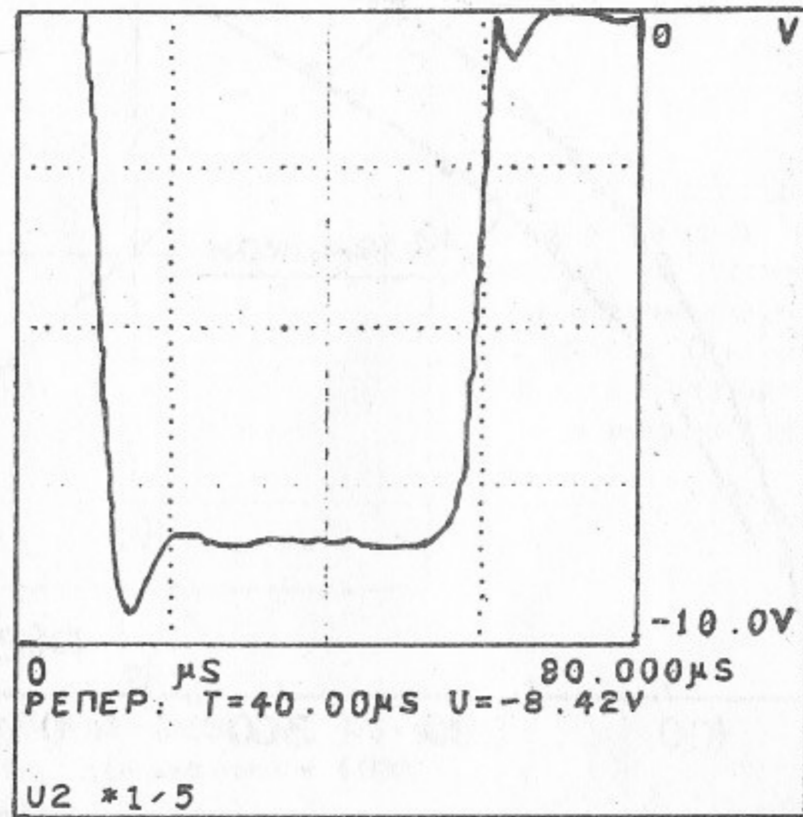
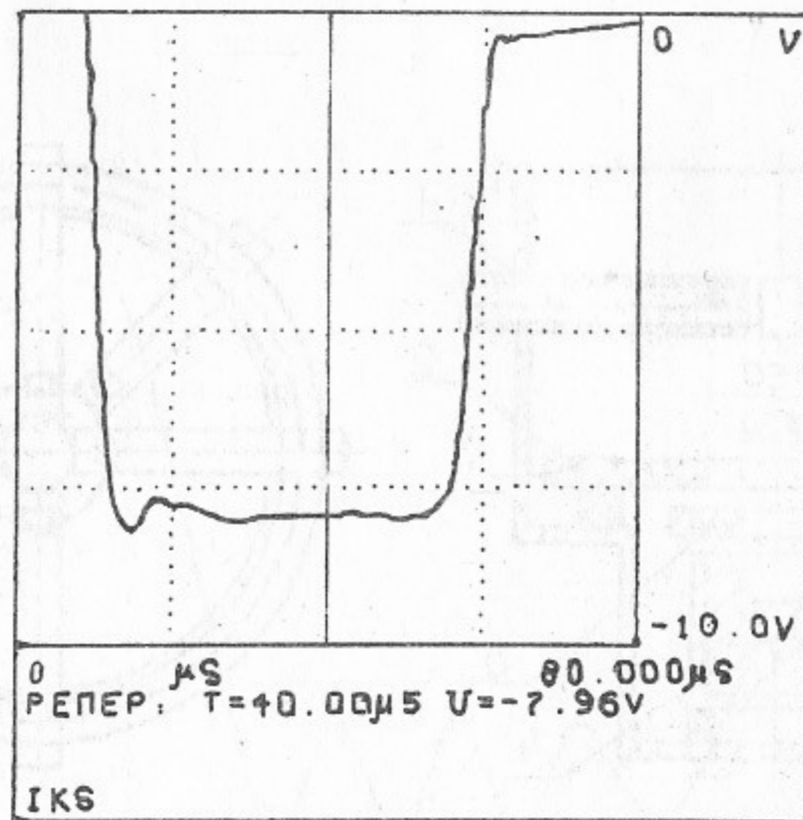


Рис. 14. Схематическое устройство коллекторной секции.
 1 — пробник; 2 — кольцевой коллектор; 3 — диафрагма; 4 — центральный коллектор.



a



b

Рис. 15. Формы импульсов напряжения на электронной пушке (a) и тока пучка (b).

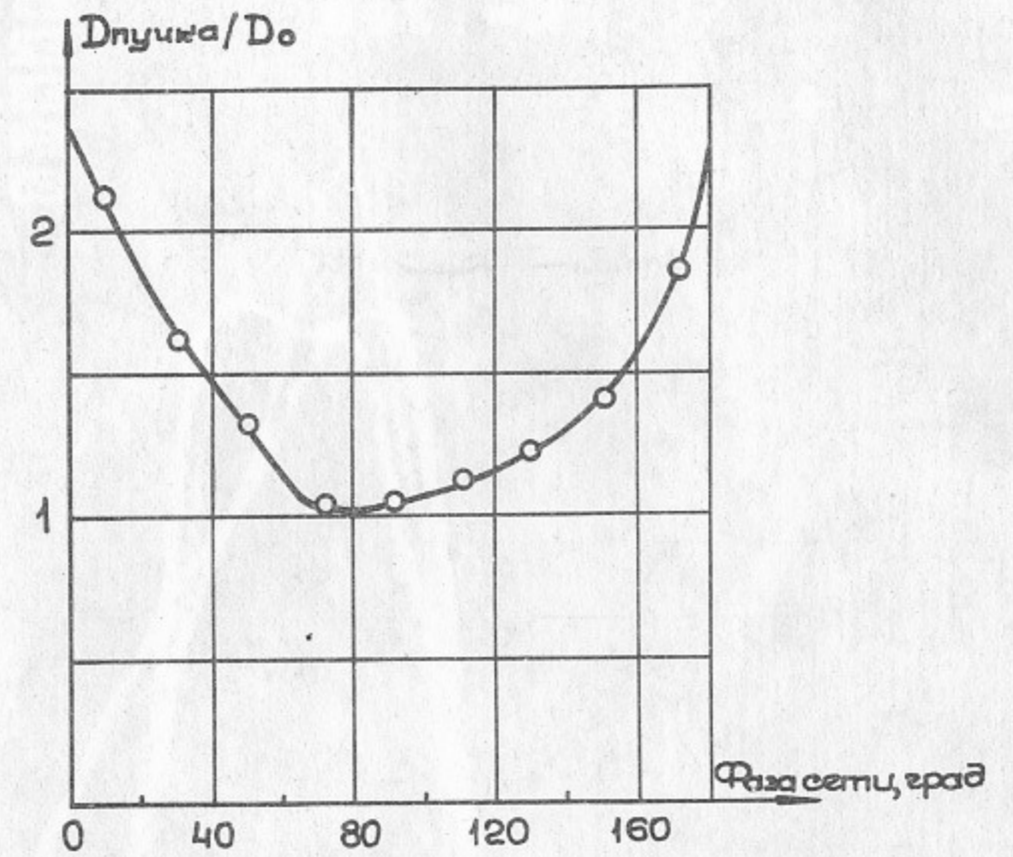


Рис. 16. Зависимость относительного радиального размера пучка от фазы сети питания накала пушки. D_0 — минимальный радиальный размер (9.5 мм).

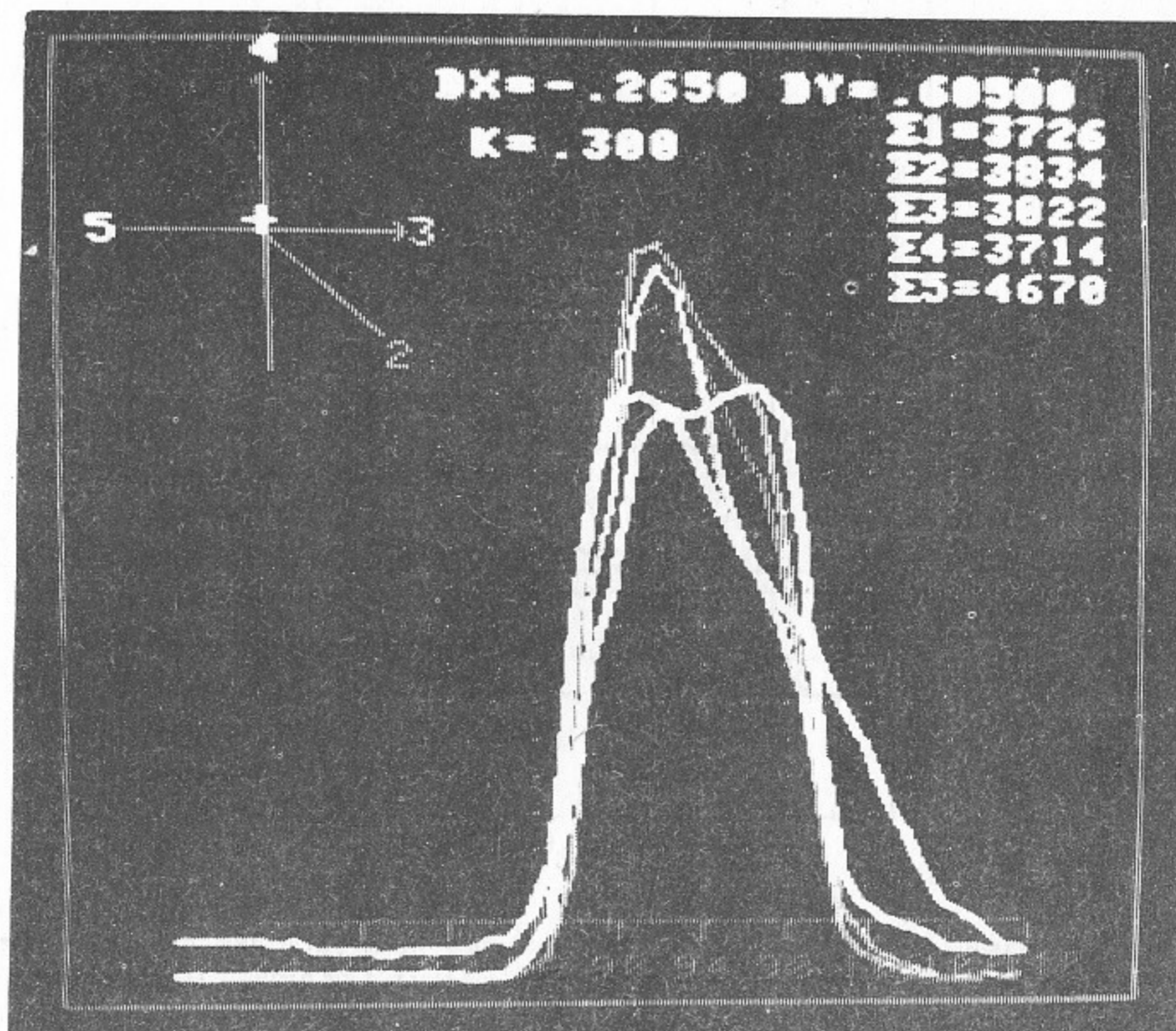


Рис. 17. Распределение плотности тока и размер развернутого по кругу пучка, снятое пробниками коллекторной секции.

А.Н. Белов, Е.В. Козырев, Г.И. Кузнецов,
 О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко,
 М.А. Тиунов, Б.С. Эстрин

Источник электронов
 импульсного магнотрона

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 22 апреля 1988 г.
 Подписано в печать 5.05.1988 г. МН 08299
 Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,3 печ.л., 1,9 уч.-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 66

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.