

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР ²⁰
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В.Е.Балакин, Г.Н.Кузнецов, Н.Г.Хавин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

ПРЕПРИНТ 80-63



Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

В.Е.Балакин, Г.Н.Кузнецов, Н.Г.Хавин

А Н Н О Т А Ц И Я

Проведено математическое моделирование на ЭВМ электронно-оптической системы. Расчитаны форма и размеры электронного пучка, необходимые потенциалы внешнего электрического поля, распределение и амплитудное значение внешнего магнитного поля. Экспериментально исследованы тепловые и эмиссионные свойства катодного узла данной системы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

Балакин В.Е., Кузнецов Г.Н., Хавин Н.Г.

В настоящее время интенсивно развивается для различных практических применений электронные пучки с импульсной мощностью в десятки и сотни мегаватт.

В работе проведено математическое моделирование электронно-оптической системы импульсной мощностью ~ 100 Мватт; и экспериментальное исследование тепловых и эмиссионных свойств катодного узла данной системы.

Расчет электронно-оптической системы

Исходными данными при расчете были следующие параметры: полный ток $I \geq 500$ А, диаметр пучка на выходе системы $d_n = 2$ см, диаметр канала $d_k = 4,6$ см, материал катода LaB_6 , плотность тока эмиссии $j \approx 30$ А/см² принята с учетом того, что часть тока перехватывается анодной сеткой. (Рабочая температура катода $T = 1700^\circ\text{C}$, ограничена условием испарения материала катода). Полная площадь катода $S = I/j = 20$ см².

Исходя из условия транспортировки пучка по трубе дрейфа [1]

$$|I_B| < I_{ск} \equiv \frac{mc^3}{2e \ln(R_{тр}/r_n)} (\gamma_0^{2/3} - 1)^{3/2} \quad (1)$$

где $I_{ск}$ - критический ток, c - скорость света в вакууме, e , m - заряд и масса электрона, $R_{тр}$ - радиус канала, r_n - радиус пучка, γ_0 - релятивистский фактор, I_B - полный ток, можно из формулы (1) оценить минимальную энергию пучка, необходимую для его проводки по дрейфовой трубе без запираения.

Для следующих исходных данных: $I_B = 500$ А, $r_n = 1$ см, $R_{тр} = 2,3$ см минимальный потенциал $\Phi_n \geq 110$ кВ. Так как поставленная задача требует получить значительно большую плотность тока в трубе дрейфа $j \approx 160$ А/см², чем плотность тока пучка после прохождения анодной сетки $j_c = 25$ а/см², необходимо создать сходящийся поток с компрессией по площади ~ 6.4 раза. Рассмотрим электронный поток, имеющий вид шарового сектора с углом при вершине равным 2θ . Исходя из выпускаемых промышленностью стандартных таблеток LaB_6 диаметром $d_T = 5$ см и толщиной $t = 0.3$ см и с учетом равномерного прогрева материала катода, максимальный допустимый угол при вершине катода выбираем $2\theta = 10^\circ$. Для улучшения сходимости электронного потока, а также для его дальнейшей транспортировки по каналу применяется внешнее магнитное поле. Для оценки необходимой величины внешнего магнитного поля рассмотрим задачу о распространении релятивистского ламинарного электронного пучка в эквипотенциальном пространстве с однородным магнитным полем $B_z = \text{const}$. Можно показать, что если угол наклона граничной траектории $\alpha_0 = 0$, то величину магнитного поля можно подобрать такой, что действия объемного заряда и магнитного поля будут взаимно скомпенсированы и пучок останется цилиндрическим.

Если величину магнитной индукции выразить в гауссах, оценочная формула для равновесного поля будет иметь вид [2]:

$$B_z = \frac{37}{r_n} \left[\frac{I_B}{\beta \gamma_0} \right]^{1/2} \quad (2)$$

где $\beta = \frac{v}{c}$. Для выбранных параметров эта величина составляет ~ 1000 Гс.

В виду того, что режим полностью экранированного катода от магнитного поля является наиболее экономичным с точки зрения получения максимальной фокусирующей силы при данном значении магнитной индукции, для дальнейших расчетов выбрана величина магнитного поля на катоде, рав-

ная 0 с последующим нарастанием поля вдоль оси системы. При наличии внешнего магнитного поля электронный поток приобретает азимутальную компоненту скорости и оценка минимальной энергии пучка по формуле (1) становится заниженной. Исходя из вышеприведенных оценок была выбрана схема оптики. Эта система, конструктивные элементы которой показаны на рис.1, состоит из вогнутого сферического эквипотенциального катода 1, фокусирующего электрода 4, сеточного анода 2, электромагнитной линзы 3, изолятора 5. Данная схема оптики в дальнейшем рассчитывалась на ЭВМ. Для расчетов использовался комплекс программ решения электронно-оптических задач [2]. Решалась самосогласованная с учетом собственных электромагнитных полей краевая задача о движении электронного потока во внешних электрическом и магнитных полях. В результате серии расчетов, когда менялись форма электродов, их взаимное место-положение, потенциалы внешнего электрического поля, амплитудное значение и распределение внешнего магнитного поля, были приняты следующие параметры системы: радиус сферы катода $R_k = 27$ см, радиус сферы анода $R_a = 24,7$ см, диаметр катода $d_k = 5$ см. Полное ускоряющее напряжение $U = 160$ кВ, ток пучка $I_B = 520$ А, максимальная амплитуда внешнего магнитного поля на оси системы $B_z \approx 1500$ Гс. Размер пучка на расстоянии $L = 15$ см от катода при указанных параметрах составил $r = 1$ см. Расчитанное распределение внешнего магнитного поля на оси системы и результаты траекторного анализа оптики изображены на рис.2.

Экспериментальные характеристики катодного узла электронно-оптической системы

Для проведения экспериментальных исследований в соответствии с рис.3 был изготовлен катодный узел. Исследования проводились в металлическом объеме с безмасляной откачкой, с вакуумом до $\sim 10^{-6}$ мм ртутного столба. Прототипом этого катодного узла послужил хорошо зареко-

мендовавший себя в работе катодный узел ускорителя для генерации СВЧ [3], который при $d_k = 5$ см потребляет мощность ~ 1300 ватт, имеет равномерную температуру катода и при плотности тока $j \approx 50$ А/см² долговечность работы в ускорителе ~ 300 часов. По условиям эксплуатации новый катодный узел должен быть горизонтального исполнения. Описанная в работе [3] электронная пушка имеет вертикальное исполнение. Когда эта пушка была испытана в горизонтальном положении, то оказалось, что через 20 часов работы при температуре катода $T = 1700^\circ\text{C}$, лента нагревателя касается стенки и катодный узел выходит из строя. Поэтому для дальнейших экспериментов с катодным узлом горизонтальной установки была спроектирована и изготовлена новая конструкция подвески ленты нагревателя.

Эта конструкция испытывалась на стенде в течении 150 часов, деформации нагревателя не обнаружены.

Все элементы катодного узла (рис.3) выполнены из тантала. Катод - $L_a B_6$ закреплен между двумя цилиндрами через графитовую прокладку. Достаточная экранировка по тепловому потоку (10 боковых листов и 10 экранов задней стенки) существенно уменьшает нагрузку на нагреватель. Вольт-амперная характеристика нагревателя показана на рис.4.

На рис.5 приведена измеренная зависимость температуры катода от подведенной мощности. Если для оценки принять $\epsilon = 0.5$ (ϵ - интегральный коэффициент черноты $L_a B_6$) то $\sim 75\%$ подведенной мощности излучается катодом. Для сравнения укажем, что катодный узел вертикального исполнения [3] потребляет на 10% меньшую мощность.

Для определения эмиссионных свойств катода был собран экспериментальный диод. Импульсный источник питания диода имел следующие характеристики $U = 40$ кВ, $I = 1000$ А, длительность импульса $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ сек.

Экспериментальные вольт-амперные характеристики диода приведены на рис.6. Как известно, эмиссия катода зависит не только от температуры, но и от качества таблет-

ки $L_a B_6$, при одной и той же подведенной мощности и одинаковой температуре эмиссионная способность катодов может отличаться $\sim 2-3$ раза.

Из рис.6 видно, что для данного катода ток $I = 500$ А получен при $T = 1700^\circ\text{C}$ и мощности 1300 ватт. Максимальная мощность, которая кратковременно ($t = 10$ минут) подводилась к катоду ~ 2000 ватт, температура катода при этом $T = 2000^\circ\text{C}$.

Оценим температурные нагрузки на анодную сетку нашей системы. Критерием импульсного нагрева сетки при экспериментальной работе можно считать заметную (> 5 А/см²) эмиссию с сетки при импульсном нагреве её поверхности электронным пучком. Для тантала эта температура $2300-2400^\circ\text{C}$.

Оценочный расчет [4] показывает, что при длительности импульса $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$ сек и постоянной плотности тока, начиная с энергии ~ 70 кэВ, импульсная температура поверхности мишени не растет с увеличением энергии электронов из-за увеличения глубины пробега. Так, например, для импульсного нагрева поверхности тантала на $\Delta T = 1800^\circ$ необходима плотность тока ~ 35 а/см².

Эксперимент с катодом $L_a B_6$ площадью $S = 2$ см² при $U = 140$ кВ и длительности импульса $1 \cdot 10^{-6}$ сек показал, что эмиссия с сетки появляется при плотности тока > 50 а/см². При длительности импульса $2 \cdot 10^{-6}$ сек и напряжении $U = 140$ кВ плотность тока при появлении эмиссии > 25 а/см². Температура сетки при этом была $\sim 700^\circ\text{C}$.

В нашем случае по оценке большая часть сетки нагревается излучением с катода до температуры $\sim 1100^\circ\text{C}$, однако произведенная оценка и экспериментальные данные позволяют надеяться, что импульсная температура сетки при выбранном напряжении и токе, не будет достигать значений, при которых появляется значительная эмиссия.

В заключении отметим, что при стендовых испытаниях катодный узел в горизонтальном положении отработал 152 часа, из них 82 часа при $T = 1680^\circ\text{C}$ и 70 часов при $T = 1750^\circ\text{C}$, было сделано 30 включений катодно-

го узла. Периодически проверялась эмиссионная способность катода. За время испытаний эмиссия катода практически не изменилась.

Авторы выражают благодарность Г.И.Яснову за полезные обсуждения, П.В.Соломатину за помощь в изготовлении катодного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов. Мощные релятивистские электронные пучки в плазме и в вакууме. Препринт ИЯФ 119-74, Новосибирск, 1974 г.
2. В.Я.Иванов, Н.Г.Хавин. Численный метод расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц. Препринт ИЯФ 77-114, Новосибирск, 1977 г.
3. В.Е.Балакин и др.
"Импульсный сильноточный ускоритель для генерации СВЧ" Всесоюзный семинар "Релятивистские пучки и их применение для генерации, усиления и преобразования электромагнитных колебаний". 21-23 декабря 1977 г., г.Москва.
4. В.Ф.Коваленко "Теплофизические процессы и электровакуумные приборы". 1975 г. г.Москва из-во "Советское радио".

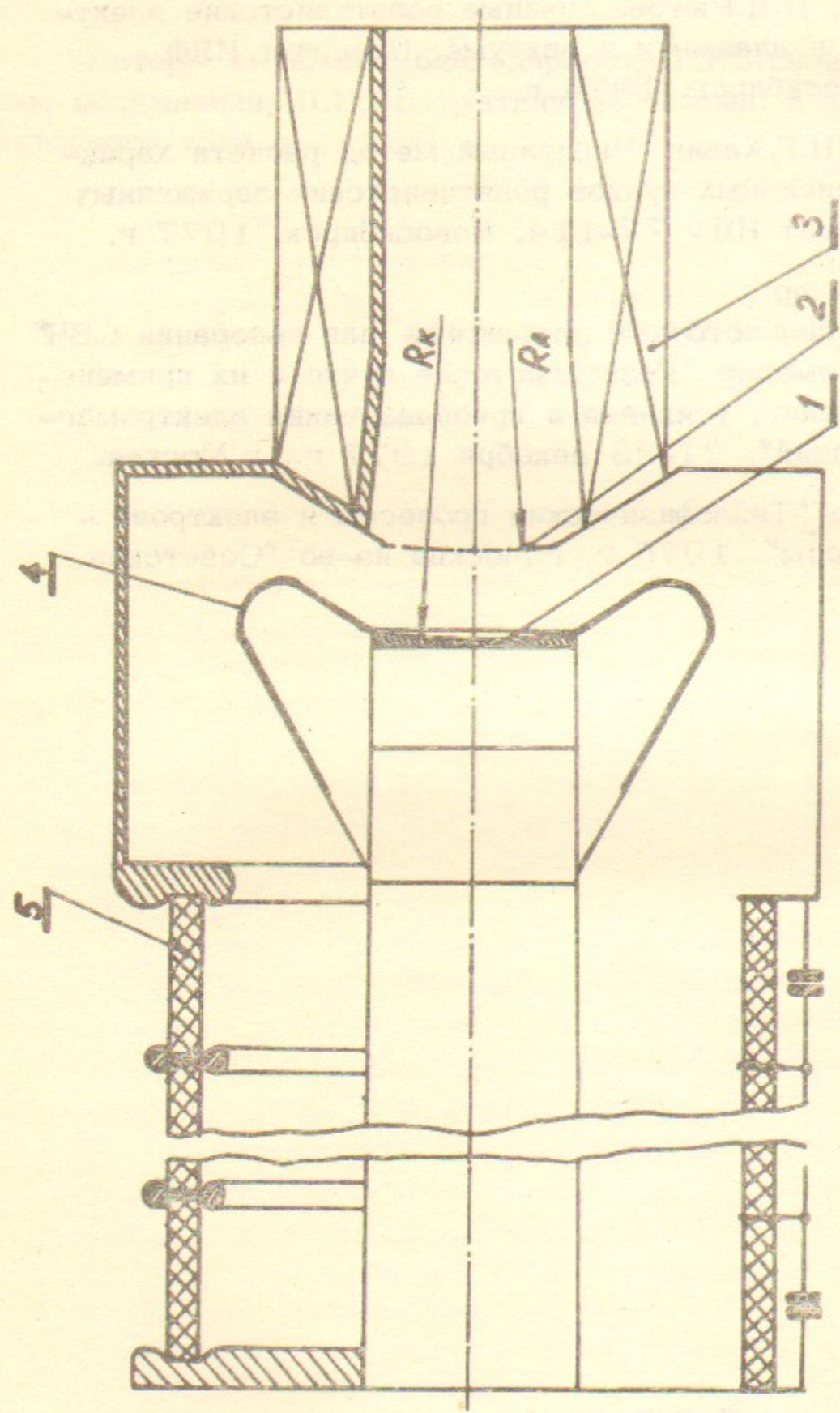


Рис.1. Схематический вид электронной пушки
 1-катод; 2-сеточный анод; 3-электромагнитная линза; 4-фокусирующий электрод; 5-изолятор.

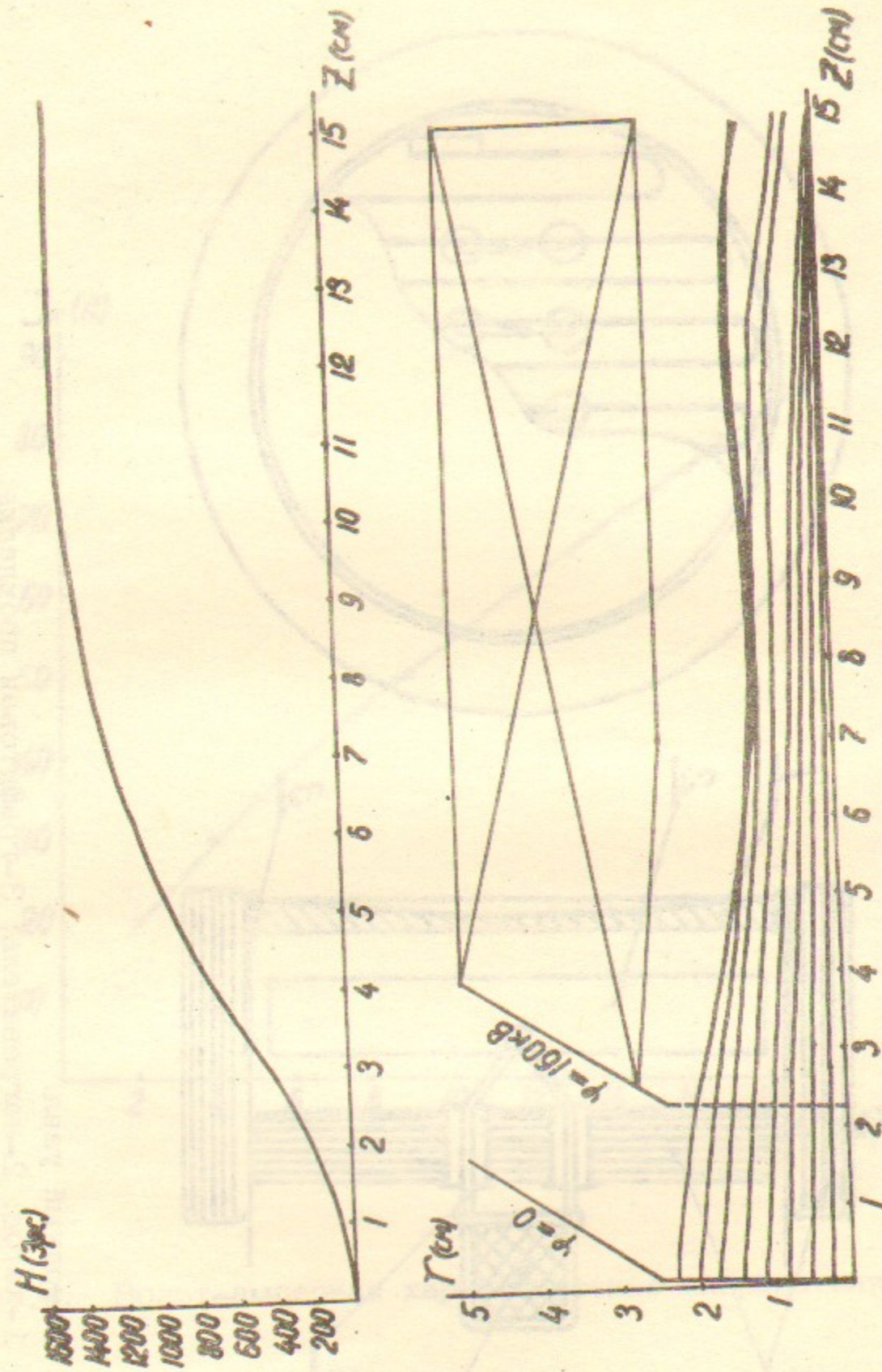


Рис.2. Вверху - осевое распределение магнитного поля;
 внизу - рассчитанные траектории электронов.

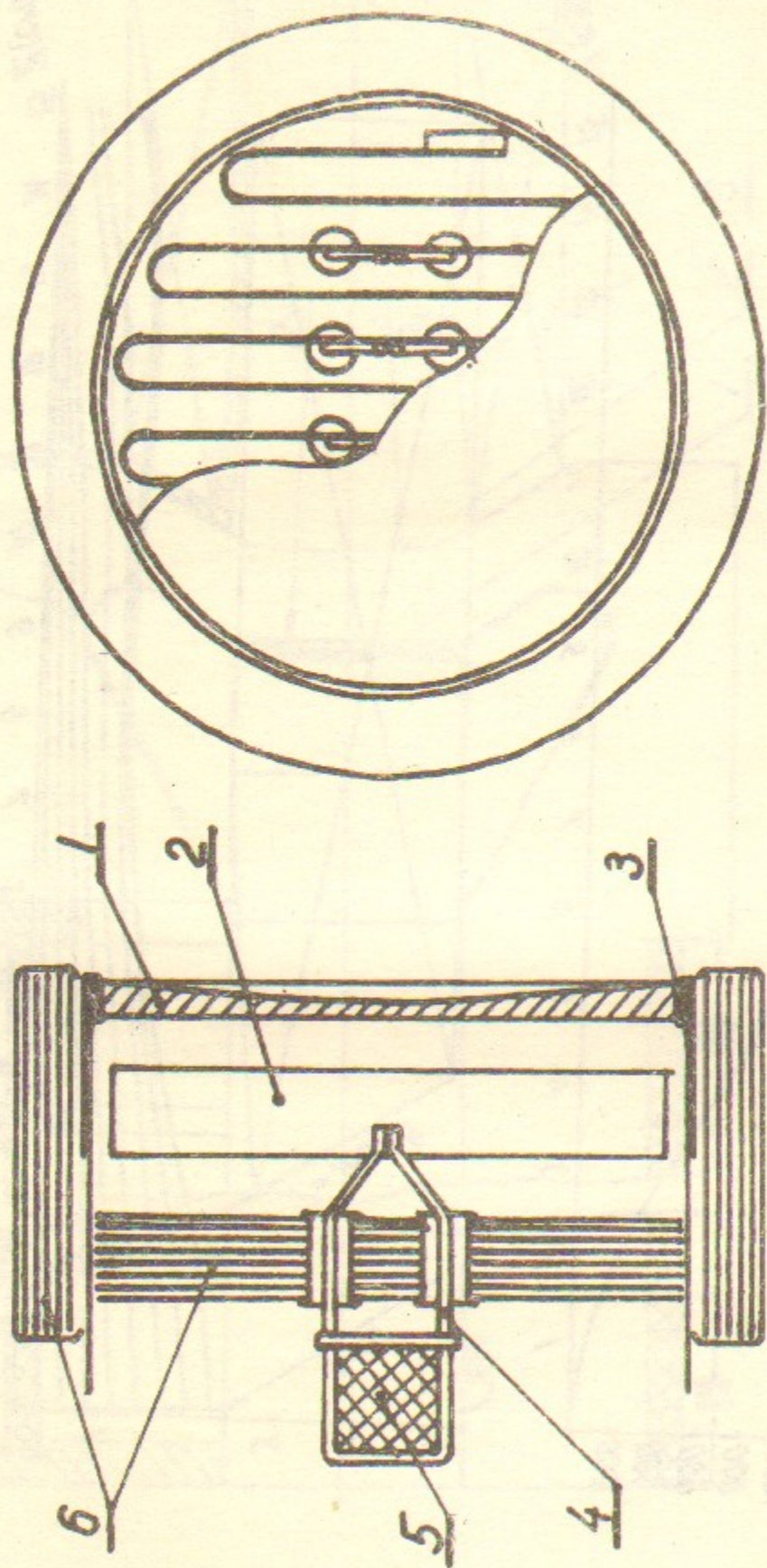


Рис.3. Катодный узел.
 1-катод; 2-нагреватель; 3-графитовая прокладка;
 4-элемент подвески нагревателя; 5-изолятор подвески;
 6-тепловые экраны.

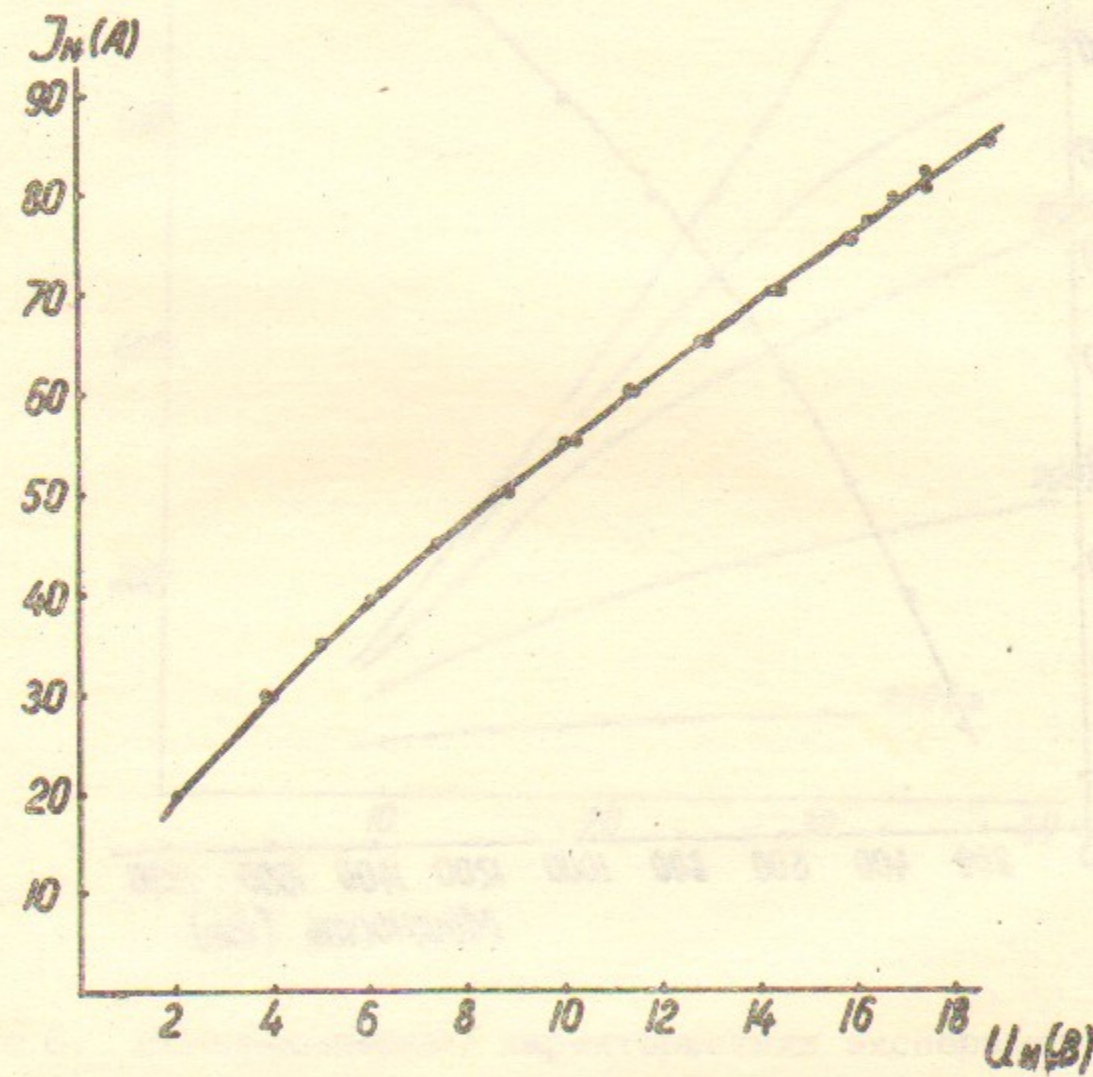


Рис.4. Вольт-амперная характеристика нагревателя.

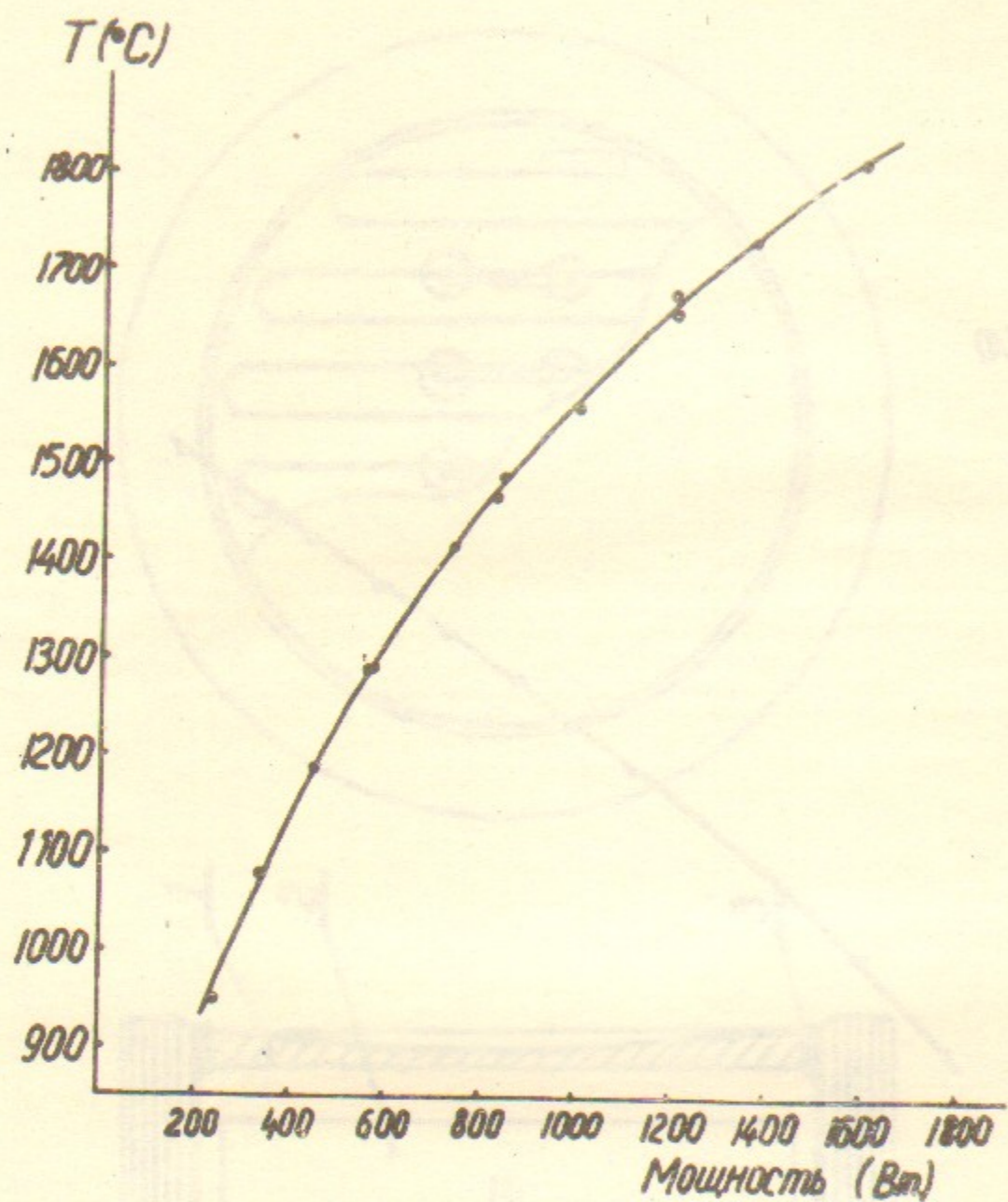


Рис.5. Зависимость температуры катода от подведенной мощности.

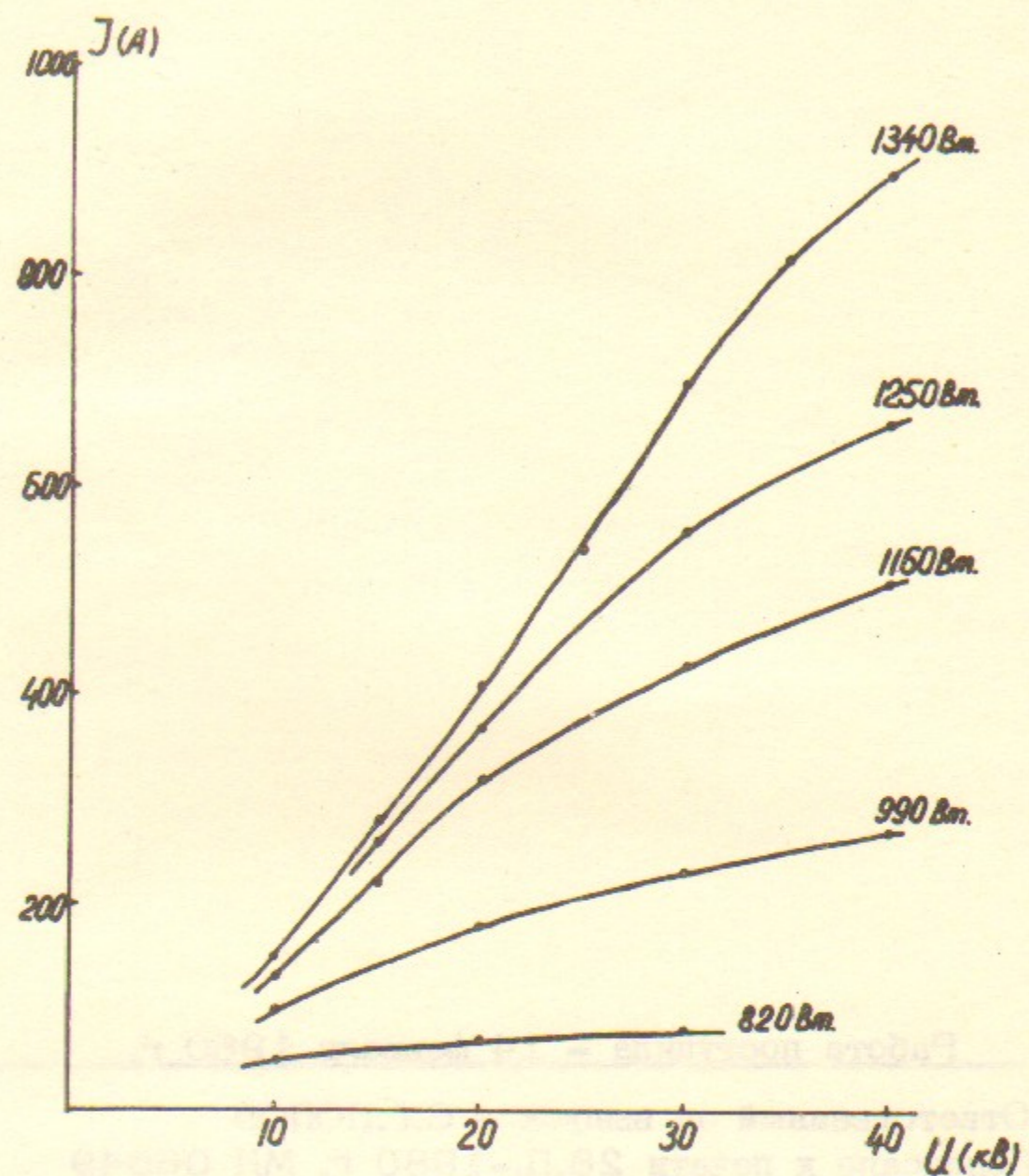


Рис.6. Вольт-амперные характеристики экспериментального диода в зависимости от мощности, подведенной к катоду.