

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **ВАКУУМНЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА**

Методические указания по курсовому проектированию  
для студентов направления  
210100.62 - «Электроника и наноэлектроника»  
(профили – Квантовая и оптическая электроника;  
Электронные приборы и устройства)

2014

**Аксенов Александр Иванович**  
**Злобина Алевтина Федоровна**  
**Панковец Николай Георгиевич**

Вакуумные и плазменные приборы и устройства = Вакуумные и плазменные приборы и устройства: методические указания по курсовому проектированию для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника (профили: Квантовая и оптическая электроника; Электронные приборы и устройства) / А. И. Аксенов, А.Ф. Злобина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2014. – 66 с.

Материал пособия поможет закрепить теоретические знания, а также вырабатывать навык в решении практических вопросов и задач.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- способностью осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9);
- способностью аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Пособие предназначено для студентов очной формы, обучающихся по направления 210100.62 – «Электроника и наноэлектроника» (профили – Квантовая и оптическая электроника; Электронные приборы и устройства) по дисциплине «Вакуумные и плазменные приборы и устройства».

© Аксенов Александр Иванович, 2014  
© Злобина Алевтина Федоровна, 2014  
© Панковец Николай Георгиевич 2014

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

## **ВАКУУМНЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА**

Методические указания по курсовому проектированию  
для студентов направления  
210100.62 - «Электроника и наноэлектроника»  
(профили: Квантовая и оптическая электроника;  
Электронные приборы и устройства)

Разработчик  
доцент каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ А.И.Аксенов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г

\_\_\_\_\_ А.Ф. Злобина  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г

\_\_\_\_\_ Н.Г. Панковец  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	5
2. Цели и задачи курсового проектирования .....	6
3. Тематика курсовых проектов .....	6
4. Структура курсового проекта .....	11
5. Календарный график выполнения курсового проекта .....	12
Наименование этапа.....	12
6. Электронно-оптические системы установок.....	13
технологического назначения.....	13
6.1. Общие сведения .....	13
6.2. Электронно-оптическая система для сварки .....	13
6.3. Электронно-оптическая система для плавки .....	14
6.4. Электронно-оптическая система для размерной обработки... ..	16
7. Расчет электронных пушек .....	18
7.1. Расчет слаботочных низкоперевеансных пушек.....	18
7.2. Расчет высокоперевеансных пушек .....	23
8. Электронные линзы .....	29
8.1. Линза-диафрагма.....	29
8.2. Иммерсионная линза .....	31
8.3. Иммерсионный объектив.....	33
8.4. Симметричная линза .....	35
8.5. Магнитная линза .....	37
9.1. Введение .....	42
9.2. Оператор $rkfixed(\vec{y}, x_{\min}, x_{\max}, \mathbf{M}, \vec{D})$ .....	45
Приложение 1 .....	49
Приложение 2 .....	51
Приложение 3.....	54
Приложение 4.....	56
Приложение 5.....	61
Список использованных источников .....	65

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электронные и ионные пучки широко используются в различных промышленных технологических установках для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления и для физических исследований. Такое широкое применение электроннолучевые методы получили благодаря особенностям электроннолучевых методов обработки металлов, а также широкой номенклатурой материалов, применяемых в промышленности, обладающих специальными свойствами, обработка которых существующими методами затруднена или невозможна.

Пучки электронов используются не только для обработки изделий, но и для контроля результатов этой обработки. Взаимодействие пучка частиц с веществом приводит к появлению новых квантов в виде электронов и фотонов. Регистрация этих квантов позволяет получить информацию о составе, структуре и размерах получаемого изделия. Контроль может осуществляться непосредственно в процессе технологической обработки изделия, что позволяет автоматизировать технологический процесс.

При создании электронно-лучевой установки основной задачей является разработка электронно-оптической системы, способной создать пучки электронов с необходимыми параметрами. Эти задачи могут быть решены только специалистами, овладевшими новыми методами обработки материалов и способными создать сложные электронно-лучевые установки. Однако, среди технической литературы, посвященной электрофизическим способам обработки материалов до настоящего времени нет учебного пособия, в котором были бы обобщены вопросы разработки электронно-оптических систем установок технологического назначения. В связи с этим данное методическое пособие будет полезным для студентов специальности "Вакуумные и плазменные приборы и устройства" при выполнении курсового проекта.

Пособие не претендует на полноту и всестороннее освещение всех вопросов, рассматриваемых в курсовом проекте.

## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовое проектирование является заключительным этапом изучения курса "Вакуумные и плазменные приборы и устройства".

Целью курсового проектирования является:

- 1) закрепление и расширение теоретических и практических знаний по данному курсу;
- 2) применение полученных знаний для решения конкретных технических задач;
- 3) развитие навыков самостоятельной работы при проектировании конкретных устройств;
- 4) освоение методов расчета и проектирования с применением вычислительной техники;
- 5) получение навыков поиска и работы с научно-технической литературой.

Курсовой проект должен отражать последние достижения науки и техники, а принятые технические решения должны быть рациональными в технико-экономическом отношении.

Самостоятельная разработка данного курсового проекта подготавливает студента к успешному выполнению дипломного проекта и является важным этапом в формировании специалиста в области электроники.

## 3. ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

Курсовой проект по дисциплине "Вакуумные и плазменные приборы и устройства" посвящен большому разделу курса - электронно-лучевым приборам. Студентам предлагается широкий спектр тем по разработке электронно-оптических систем для электроннолучевых установок технологического назначения, а также различных электронно-лучевых трубок и плазменных устройств.

Темы курсовых проектов должны удовлетворять следующим критериям:

- 1) проектируемое устройство должно иметь достаточно сложную электронно-оптическую систему, чтобы её разработка потребовала бы от студента определенных творческих усилий;
- 2) проектируемое устройство должно быть функционально законченным и иметь самостоятельное эксплуатационное значение;
- 3) проектируемое устройство должно отвечать современным требованиям технической эстетики;
- 4) устройство должно иметь такую компоновку, которая позволяла бы быструю замену вышедших из строя деталей и узлов.

Программа дисциплины "Вакуумные и плазменные приборы и устройства" рекомендует следующий примерный перечень тем курсового проекта:

- 1) электронно-оптическая система установки для размерной обработки материалов;
- 2) электронно-оптическая система установки для сварки материалов электронным лучом.;
- 3) электронно-оптическая система установки для плавки металлов электронным лучом;
- 4) электронно-оптическая система установки для электронной литографии;
- 5) электронно-оптическая система установки для электронно-лучевого испарения материала;
- 6) электронно-оптическая система приемной телевизионной трубки.

### **Варианты заданий курсовых проектов по дисциплине "Вакуумные и плазменные приборы и устройства"**

#### **Вариант №1**

Спроектировать электронно-оптическую систему для сварки электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 20 кВ.
2. Ток пучка электронов – 59 мА.
3. Диаметр пучка на мишени – 0,5 мм.
4. Развертка луча – линейная.
5. Угол отклонения луча - 30°.
6. Режим работы – непрерывный.

#### **Вариант №2**

Спроектировать электронно-оптическую систему для размерной обработки материалов электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 80 кВ.
2. Ток пучка электронов – 10 мА.
3. Диаметр пучка на мишени – 30 мкм.
4. Развертка луча – растровая.
5. Размеры растра - 30×30 мм.
6. Режим работы – импульсный.

**Вариант №3**

Спроектировать электронно-оптическую систему для плавки металлов электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 25 кВ.
2. Ток пучка электронов – 200 мА.
3. Диаметр пучка – 5 мм.
4. Развертка луча – кольцевая.
5. Диаметр кольцевой развертки – 50 мм.
6. Режим работы – непрерывный.

**Вариант №4**

Спроектировать электронно-оптическую систему осциллографической трубки.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 5 кВ.
2. Ток эмиссии катода – 1 мА.
3. Диаметр луча на экране – 0,5 мм.
4. Развертка луча – линейная.
5. Угол отклонения луча - 20°.

**Вариант №5**

Спроектировать электронно-оптическую систему для сварки металлов электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 45 кВ.
2. Ток пучка электронов – 0,5 А.
3. Диаметр пучка на мишени – 1 мм.
4. Развертка луча – спиральная.
5. Радиус спирали – 20 мм.

**Вариант №6**

Спроектировать электронно-оптическую систему для травления молибдена электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 30 кВ.
2. Ток пучка электронов – 500 мА.
3. Диаметр пучка на мишени – 0,5 мм.
4. Развертка луча – растровая.
5. Размер растра 50 \* 50 мм.



**Вариант №7**

Спроектировать электронно-оптическую систему для плавки металлов.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 70 кВ.
2. Ток пучка электронов – 0,7 А.
3. Диаметр пучка электронов – 5 мм.
4. Материал – титан
5. Масса металла – 1 кг.

**Вариант №8**

Спроектировать электронно-оптическую распылительную систему для нанесения металлических пленок.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 40 кВ.
2. Ток пучка электронов – 0,3 А.
3. Диаметр пучка электронов – 2 мм.
4. Развертка луча - линейная .
5. Угол отклонения –  $20^{\circ}$  .

**Вариант №9**

Спроектировать электронно-оптическую систему для сварки электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 15 кВ.
2. Ток пучка электронов – 0,1 А.
3. Диаметр пучка на мишени – 1 мм.
4. Развертка луча – линейная.
5. Угол отклонения луча –  $25^{\circ}$ .
6. Режим работы – непрерывный.

**Вариант №10**

Спроектировать электронно-оптическую систему для размерной обработки материалов электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 100 кВ.
2. Ток пучка электронов – 10 мА.
3. Диаметр луча на мишени – 20 мкм.
4. Развертка луча – кольцевая.
5. Диаметр кольцевой развертки – 30 мм .
6. Режим работы – импульсный.

**Вариант №11**

Спроектировать электронно-оптическую систему для плавки металлов электронным лучом.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 30 кВ.
2. Ток пучка электронов – 100 мА.
3. Диаметр пучка – 3 мм.
4. Развертка луча – спиральная.
5. Максимальный диаметр спирали – 40 мм.
6. Режим работы – непрерывный.

**Вариант №12**

Спроектировать электронно-оптическую систему для осциллографической трубки.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 3 кВ.
2. Ток эмиссии катода – 1 мА.
3. Диаметр луча на экране – 0,3 мм.
4. Развертка луча – линейная.
5. Угол отклонения луча -  $15^\circ$ .

**Вариант №13**

Спроектировать электронно-оптическую систему для резки алмаза.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 80 кВ.
2. Ток пучка электронов – 30 мА.
3. Диаметр пучка электронов – 10 мкм.
4. Режим работы – импульсный.
5. Размер обрабатываемого изделия – 3 \* 5 мм.

**Вариант №14**

Спроектировать электронно-оптическую систему для плавки 1 кг. золота.

Исходные данные к проекту:

1. Ускоряющее напряжение – 35 кВ.
2. Ток пучка электронов – 0,2 А.
3. Диаметр пучка электронов – 1 мм.
4. Развертка луча – растровая.
5. Размер раstra - 10\*10 мм.

## 4. СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и сборочного чертежа разработанного устройства. Пояснительная записка должна включать в указанной ниже последовательности следующие документы:

- 1) титульный лист;
- 2) реферат;
- 3) задание;
- 4) содержание;
- 5) введение
- 6) основную часть;
- 7) заключение;
- 8) список использованных источников;
- 9) приложения.

Общие требования к написанию и оформлению пояснительной записки и чертежей подробно изложены в образовательном стандарте ОС ТАСУР 6.1 - 97.

Для темы курсового проекта "Электронно-оптическая система установки для сварки материалов электронным лучом" ниже приведено примерное содержание основной части пояснительной записки:

- обзор литературы;
- выбор и обоснование электронно-оптической системы;
- расчет и конструирование электронной пушки;
- расчет и конструирование фокусирующей системы;
- расчет и конструирование отклоняющей системы;
- расчет траектории электронов в линзе;
- конструирование колонны системы.

В свою очередь раздел "Расчет и конструирование электронной пушки" включает следующие пункты:

- расчет катодного узла;
- расчет геометрии электродов пушки;
- расчет угла расхождения пучка за анодом;
- тепловой расчет пушки и тигля, с испаряемым материалом ;
- конструирование пушки и тигля.

## 5. КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Календарный график предназначен для рационального распределения времени студента в период курсового проектирования, самоконтроля студентом результатов своей работы и контроля хода проектирования руководителем. График составляется руководителем совместно со студентом. Продолжительность курсового проектирования определяется учебным планом и составляет три месяца. Для компенсации непредвиденных затрат времени при составлении календарного графика необходимо предусмотреть резерв времени 5 - 7 дней раньше указанного срока.

Для достижения этого резерва времени необходимо:

- а) завести рабочую тетрадь, в которой отражать работу с литературой, патентами, а также зарисовать схемы, вести расчеты и другие сведения;
- б) систематически, ежедневно, работать над темой проекта.

Для сокращения времени, затрачиваемого студентами на поиск необходимого материала по теме проекта, в последующих главах данного пособия содержатся сведения по электронным пушкам, фокусирующим системам, а также основные расчетные соотношения. Приводится также расчет траектории электронов с применением вычислительной техники.

Примерный график выполнения курсового проекта приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Недели	Наименование этапа	Объём, %
3	Подбор и изучение литературы. Составление обзора по литературным источникам.	10
4	Анализ литературных данных, выбор и обоснование электронно-оптической системы.	10
6	Расчет и конструирование электронной пушки.	15
8	Расчет и конструирование фокусирующей системы	10
10	Расчет и конструирование отклоняющей системы.	10
12	Расчет траектории электронов.	15
13	Разработка и компоновка сборочного чертежа всей системы.	20
14	Написание пояснительной записки. Сдача проекта на проверку.	10

## **6. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УСТАНОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **6.1. Общие сведения**

В связи с бурным развитием электроники, ракетостроения, атомной энергетики интенсивные поиски новых эффективных способов нагрева материалов привели к широкому использованию нового источника нагрева - электронного луча. Электронный луч по своей удельной энергетической мощности, легкости управления, эффективности и локальности нагрева превосходит все известные источники. Благодаря этому он получил применение в металлургии, машиностроении, электронике, приборостроении для плавки, сварки, сверления, фрезеровки, пайки и др.

Основным узлом любой электронно-лучевой установки является электронно-оптическая система, обеспечивающая получение, ускорение, фокусировку и отклонение пучка электронов. В общем случае электронно-оптическая система должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) система должна формировать пучок с заданными геометрическими и электрическими параметрами;
- 2) система должна обеспечивать плавное управление параметрами пучка;
- 3) система должна быть простой, экономичной, долговечной, удобной в наладке и эксплуатации;

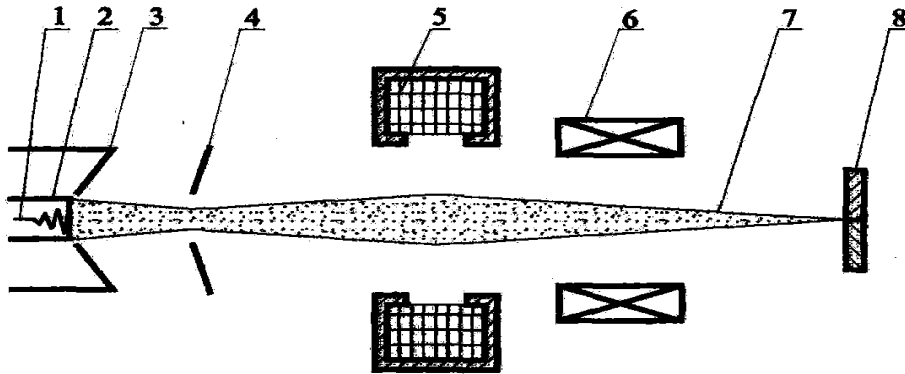
Структура электронно-оптической системы зависит от требований к параметрам пучка и от назначения установки, в которой будет использоваться система.

### **6.2. Электронно-оптическая система для сварки**

Схема электронно-оптической системы установки для сварки материалов показана на рисунке 6.1. Система состоит из электронной пушки триодного типа, обеспечивающей начальное формирование электронного пучка (кроссовер), магнитной фокусирующей системы, регулирующей размеры пятна нагрева, и электромагнитной системы отклонения пучка, позволяющей отклонять пучок при выполнении сварки по сложному контуру.

Регулировка вводимой в металл общей тепловой энергии достигается изменением ускоряющего напряжения, тока луча, тока магнитной линзы. Широкое варьирование параметров электронного луча, большие удельные мощности в луче позволяют осуществлять практически все виды швов, применяемых при сварке. Сварка электронным лучом может производиться как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Импульсное управление лучом, с помощью которого может осуществляться точ-

ная дозировка энергии луча и минимальное тепловое воздействие на околошовную зону, осуществляется подачей на фокусирующий электрод положительных импульсов напряжения. Длительность управляющих импульсов может изменяться в широком диапазоне от миллисекунд до нескольких микросекунд.



1 - подогреватель; 2 - катод; 3 - фокусирующий электрод (модулятор); 4 - анод; 5 - магнитная линза; 6 - отклоняющая система; 7 - пучок; 8 - мишень.

Рис. 6.1. Электронно-оптическая система сварочной установки

В электронных пушках для сварки применяются обычно низкие ускоряющие напряжения от 10 до 50 кВ. Мощность пушек не более 30 кВт [1]. В указанных системах в основном используются диодные и триодные пушки. В качестве эмиттеров используются термокатоды, преимущественно чисто металлические (вольфрамовые и танталовые), а также боридлантановые ( $\text{LaB}_6$ ) катоды. Оксидные катоды в установках технологического назначения не применяются, т.к. из-за частой разгерметизации рабочей камеры они быстро выходят из строя [2].

В установках для прецизионной сварки, в которых электронные пучки имеют первенство не более  $10^{-9}$  а/в<sup>3/2</sup> конструкции пушек практически не отличаются от конструкции прожекторов электронно-лучевых трубок. Сильноточные электронные пушки выполняются по типу пушки Пирса с параллельным или сходящимся пучком. Регулировка тока луча осуществляется изменением отрицательного смещения, подаваемого на фокусирующий электрод. В диодных пушках фокусирующий электрод соединен с катодом, поэтому регулировка тока луча осуществляется изменением напряжения накала катода.

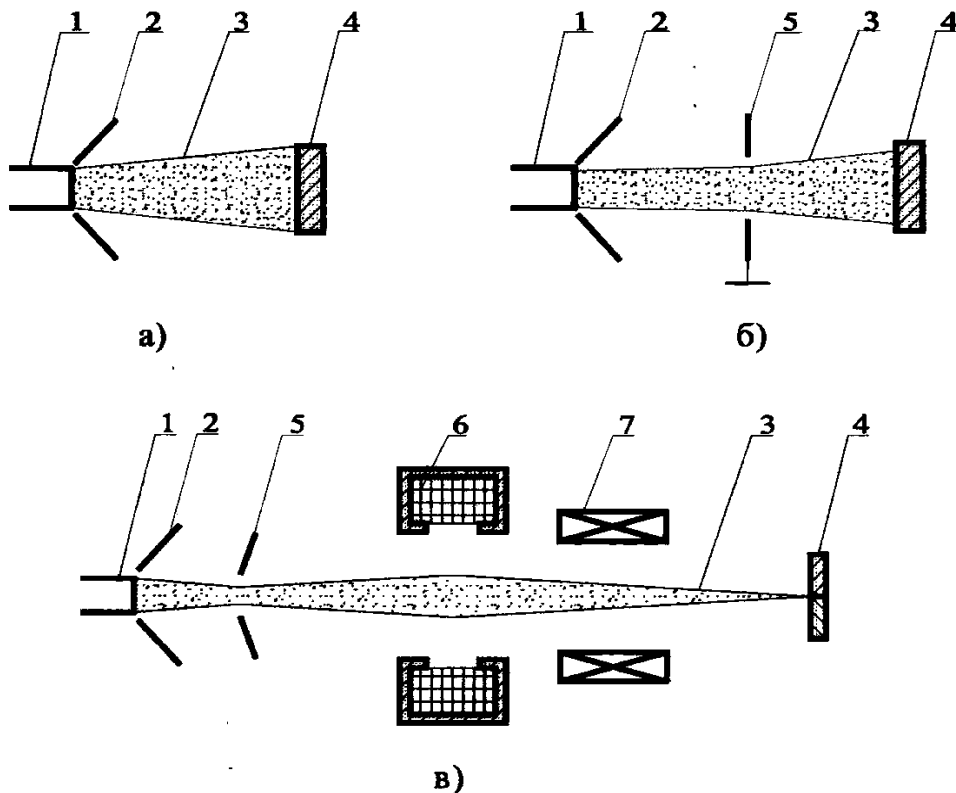
### 6.3. Электронно-оптическая система для плавки

Электронно-лучевые пушки для плавки металлов по характеристикам и условиям работы отличаются от сварочных пушек. В них используются более мощные электронные пучки, более интенсивное газо-

отделение и испарение плавящегося металла и, следовательно, более сильное колебание давления в рабочей камере. В тоже время требования к фокусировке пучка менее жесткие, поскольку зона термической обработки велика [3].

При разработке электронно-оптической системы большое значение имеет обеспечение защиты катода от ионной бомбардировки и напыление металла из расплава. Для защиты катода используют различные конструктивные меры. Во-первых, удаление пушки от расплавленной ванны, в связи с чем приходится использовать магнитные фокусирующие системы. Во-вторых, применение дифференциальной откачки, что позволяет поддерживать в пушке высокий вакуум. В третьих, искривление траекторий электронов за счет применения криволинейной оптики.

В плавильных установках используют три типа электронно-оптических систем: электронную пушку без анода, пушку с анодом и электронно-оптическую систему, содержащую пушку Пирса, магнитную линзу и электромагнитную систему отклонения пучка. В первом типе пушки анодом служит ванна жидкого металла. На рисунке 6.2 показаны типы электронно-оптических систем для плавки.



- а) - безанодный нагреватель; б) - двухэлектродная пушка;  
 в) - электронно-оптическая система с магнитным управлением.  
 1 - катод; 2 - модулятор; 3 - электронный луч; 4 - мишень;  
 5 - анод; 6 - магнитная линза; 7 - отклоняющая система.

Рис. 6.2. Типы электронно-оптических систем

В качестве катода в этих пушках используют чистые тугоплавкие металлы - вольфрам, тантал, молибден.

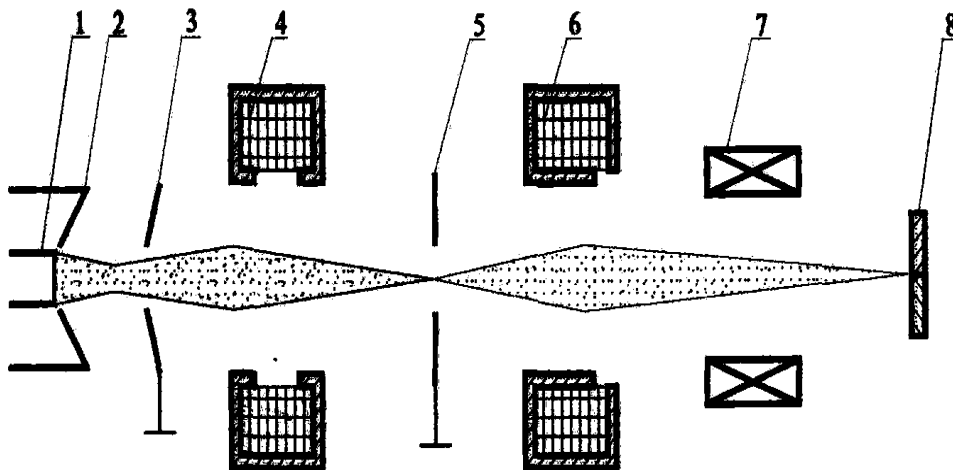
Первый тип пушки отличается простотой конструкции, но имеет серьезные недостатки, связанные с близким расположением катода к расплавленной ванне.

Второй тип пушки имеет водоохлаждаемый самостоятельный анод, массивный катод в виде вольфрамовой шайбы и фокусирующий электрод. Нагреваемый объект (мишень, тигель) находится под потенциалом анода, то есть заземлен. Существенным достоинством этого типа системы является наличие анода, что позволяет защитить катод от паров расплавленного металла, а также разделить пушку и рабочую камеру с тиглем.

Электронно-оптическая система третьего типа имеет более сложную конструкцию, содержащую кроме пушки магнитную линзу, и отклоняющую систему. Катод в этой системе удален от расплавленной ванны, что существенно снижает загрязнение его конденсирующими парами, а также от ионной бомбардировки.

#### 6.4. Электронно-оптическая система для размерной обработки

Электронно-оптическая система для размерной обработки состоит из электронной пушки, магнитной фокусирующей системы и электромагнитной системы отклонения. На рисунке 6.3 показана электронно-оптическая система установки для размерной обработки материалов.



1 - катод; 2 - модулятор; 3 - анод; 4 - конденсаторная линза; 5 - диафрагма; 6 - проекционная линза; 7 - отклоняющая система; 8 - мишень.

Рис. 6.3. Электронно-оптическая система



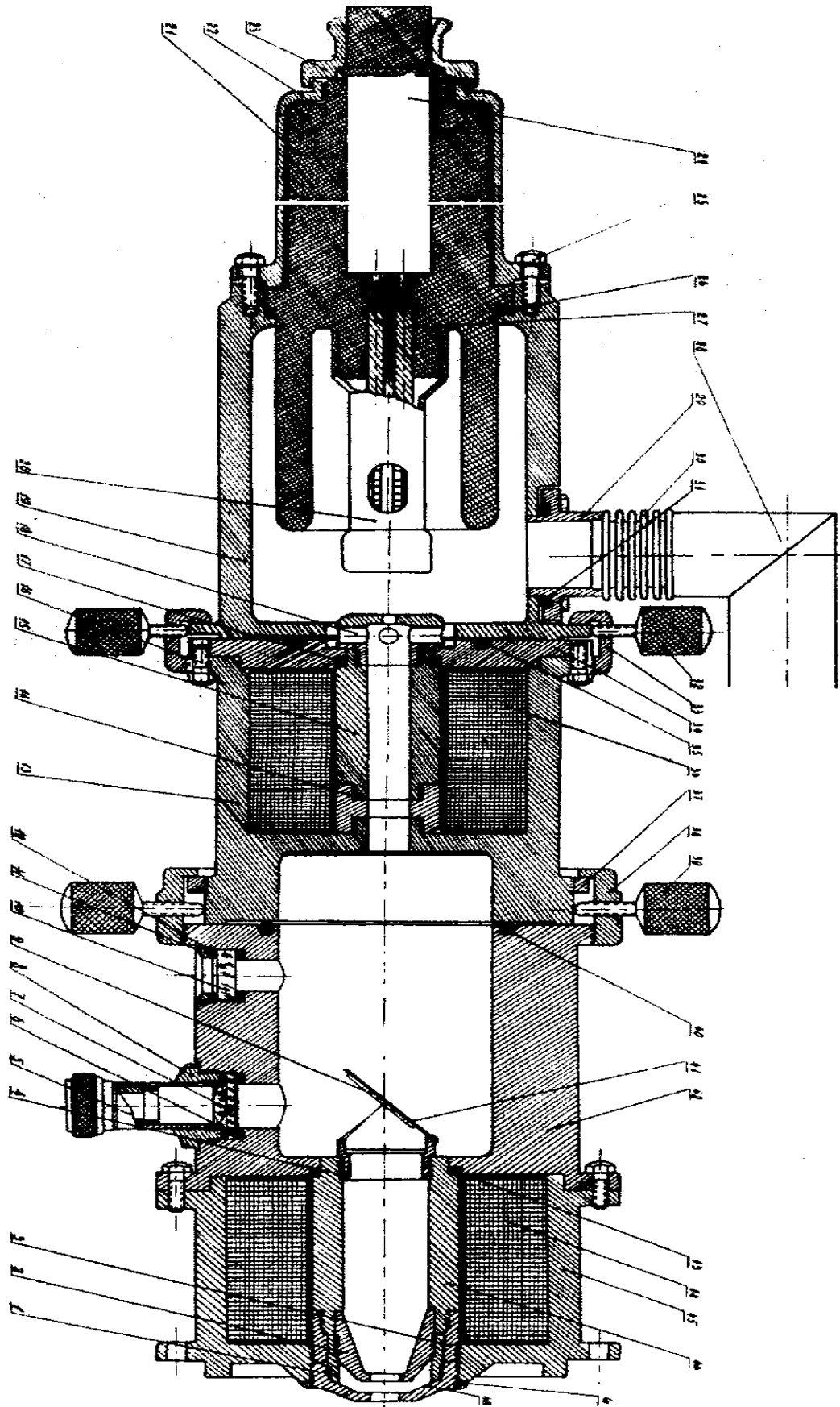


Рис. 6.4. Электронно-оптическая система установки ЛУЧ-1

Особенностью этих систем является то, что они работают в импульсном режиме, обеспечивая высокую плотность мощности в пучке  $10^8 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> [4]. Импульсный режим позволяет значительно уменьшить разогрев изделий и сократить размеры зоны термического влияния. Ускоряющее напряжение этих пушек составляет 80 - 100 кв., а диаметр пучка на обрабатываемом изделии 10-50 мкм. Фокусирующая система, как правило, содержит две магнитные линзы, позволяющие сфокусировать пучок в пятно малых размеров.

В пушках для размерной обработки применяются катоды с малой эмиттирующей поверхностью. Все элементы системы должны быть точно сфокусированы. Несовпадение осей или непараллельность их приводит к абберациям системы. Для юстировки элементов оптики применяются механические и электромагнитные системы юстировки. На рисунке 6.4 представлена электронно-оптическая система установки ЛУЧ-1. Установка предназначена для сверления микронных отверстий в твердых материалах.

## 7. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК

### 7.1. Расчет слаботочных низкоперевансных пушек

В электронно-лучевых приборах используются слаботочные электронные пушки. Основным назначением электронной пушки (прожектора) является формирование минимального сечения (кроссовера), являющегося объектом для электронной линзы, которая отображает его на мишени. При разработке электронно-оптической системы следует учитывать следующие соображения:

- 1) возможность плавной регулировки тока луча;
- 2) технология изготовления прожектора и других узлов должна быть простой;
- 3) для изготовления системы должны применяться вакуумные материалы;
- 4) прожектор должен быть экономичным в эксплуатации и долговечным.

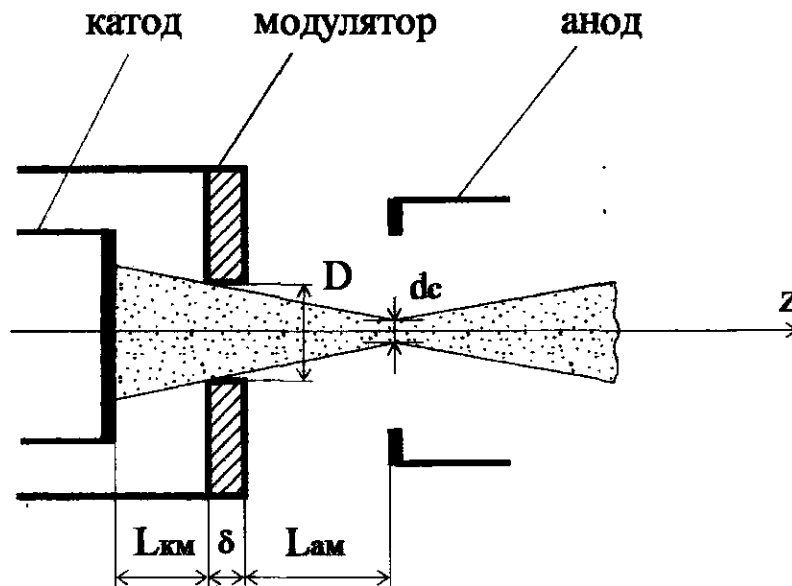
Поскольку переванс таких систем небольшой и не превышает  $10^{-9}$  а/в<sup>3/2</sup>, то для фокусировки луча используется простая параксиальная оптика, элементы которой состоят из диафрагм и цилиндров [5].

Наибольшее распространение в электронно-лучевых трубках получила оптическая система, состоящая из двух линз.

Во всех электронно-лучевых приборах первой линзой является иммерсионный объектив, состоящий из трех элементов: катода, модулятора

и анода.

На рисунке 7.1 показана схема электронной пушки, представляющая собой иммерсионный объектив.



$D$  - диаметр отверстия в модуляторе;  $\delta$  - толщина модулятора;

$L_{км}$  - расстояние катод-модулятор;  $d_c$  - диаметр кросовера;

$L_{ам}$  - расстояние анод-модулятор.

Рис. 7.1. Схема низкоперевансной электронной пушки

В качестве катода для неразборных систем целесообразно применять оксидный катод, как катод, имеющий низкую рабочую температуру при наибольшей величине удельной эмиссии.

Плотность тока эмиссии оксидного катода колеблется в пределах  $0,2 - 0,5 \text{ а/см}^2$  в зависимости от температуры [6]. Управляющий электрод (модулятор) представляет собой цилиндр, прикрытый диском с круглым отверстием. На модулятор подается отрицательный по отношению к катоду потенциал и служит для регулировки тока луча. Ускоряющий электрод (анод) выполняется обычно в виде цилиндра, а со стороны модулятора он закрыт диском с отверстием. На анод подается ускоряющее напряжение. Через отверстие в модуляторе поле анода провисает сильнее на оси и убывает в направлении радиуса. Следовательно, катод нагружен неравномерно и наибольший отбор тока с катода имеет место с его центрального участка.

На рисунке 7.2 показано распределение плотности тока по поверхности катода.

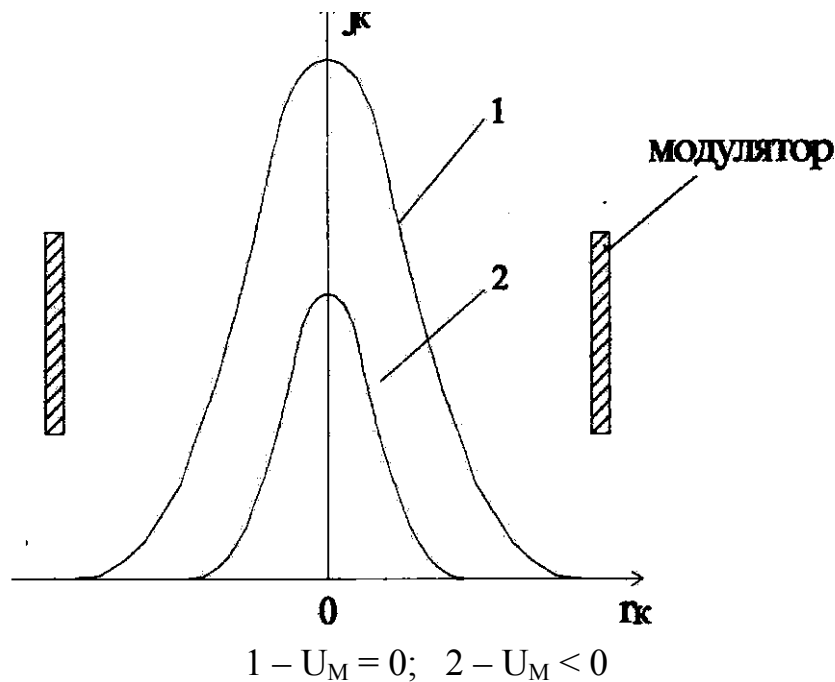


Рис. 7.2. Распределение тока по поверхности катода

Изменение потенциала модулятора оказывает двойное действие на ток катода. Во-первых ток меняется как и в триоде, за счет изменения пространственного заряда у катода Во-вторых, ток меняется за счет изменения площади поверхности катода, у которой создается положительный градиент поля (рисунок 7.2). Следовательно, изменение потенциала модулятора сопровождается более быстрым изменением тока, отбираемого с катода, чем изменение потенциала сетки в триоде. Диаметр рабочей поверхности катода определяется по формуле [5].

$$d_K = \frac{(U_3 - U_M) \cdot D}{U_3}, \quad (7.1)$$

где  $U_M$  - напряжение модулятора;  
 $U_3$  - запирающее напряжение;  
 $D$  - диаметр отверстия модулятора.

Ток с катода можно выразить следующим соотношением:

$$I_K = 3 \cdot (U_3 - U_M)^{\frac{7}{2}} \cdot (U_3)^{-2}. \quad (7.2)$$

Средняя плотность тока катода:

$$J_K = \frac{12(U_3 - U_M)^{\frac{3}{2}}}{\pi \cdot D^2}. \quad (7.3)$$

При конструировании электронного прожектора следует учитывать, что для сохранения приемлемого срока службы катода пиковую нагрузку катода не следует выбирать больше 10 ма/мм<sup>2</sup>.

Одним из наиболее существенных параметров электронного прожектора является запирающее напряжение, при котором ток катода равен нулю. Зависимость запирающего напряжения от геометрических параметров пушки выражается формулой Гайне [7]:

$$U_3 = 0.034 \cdot \frac{(D - \delta)^2}{L_{KM} \cdot L_{aM}} \cdot U_a, \quad (7.4)$$

где  $D$  - диаметр отверстия в модуляторе;

$\delta$  - толщина стенки диафрагмы модулятора;

$L_{KM}$  - расстояние катод-модулятор;

$L_{aM}$  - расстояние анод-модулятор;

$U_a$  - ускоряющее напряжение.

Угол расхождения пучка в скрещении:

$$\sin(\alpha) = 0.3 \frac{D}{(L_{aM})^{0.75}} \cdot \frac{(U_3 - U_M)}{U_3}. \quad (7.5)$$

Радиус скрещения можно найти из следующего уравнения:

$$0.1 = \exp\left(\frac{e \cdot U_a \cdot r_c^2 \cdot \sin(\alpha)}{k \cdot T \cdot r_k^2}\right), \quad (7.6)$$

где  $T$  - температура катода;

$k$  - постоянная Больцмана;

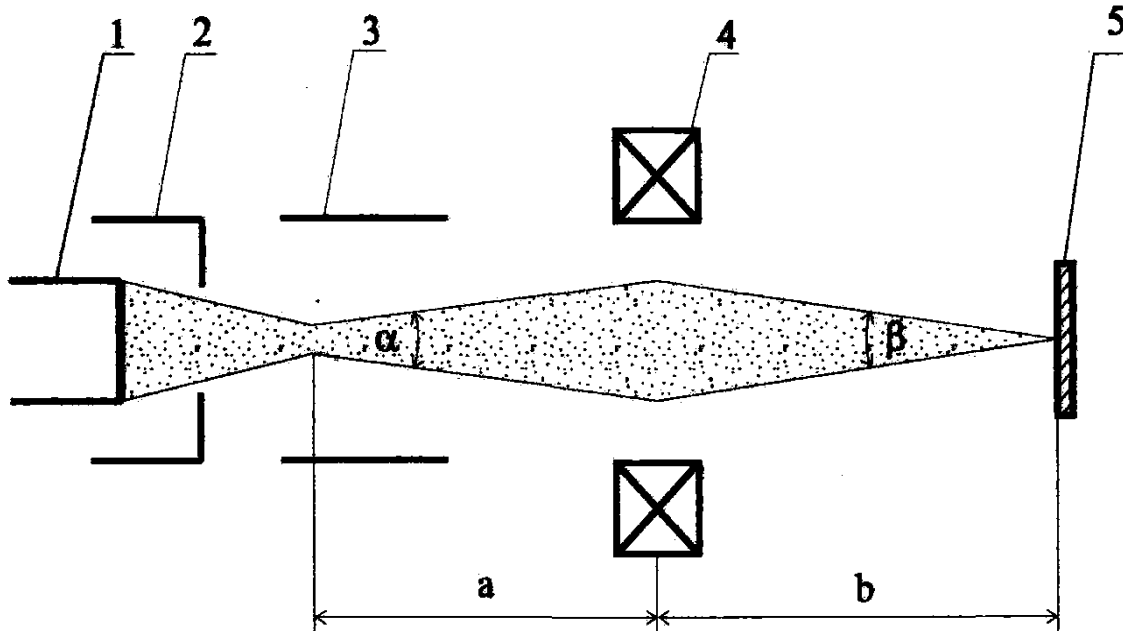
$r_c$  - радиус скрещения;

$r_k$  - радиус катода;

$U_a$  - потенциал анода (ускоряющего электрода);

$\sin(\alpha)$  - угол расхождения пучка в скрещении.

Для электронно-оптической системы, состоящей из иммерсионного объектива и проекционной линзы (магнитной или электростатической) можно определить диаметр пятна на мишени, используя уравнение Лагранжа-Гельмгольца [7]. На рисунке 7.3 показана электронно-оптическая система, состоящая из двух линз.



1 - катод; 2 - модулятор; 3 - анод; 4 - линза; 5 - мишень.

Рис. 7.3. Двухлинзовая электронно-оптическая система

$$r_{\Pi} = r_c \frac{b \cdot \sqrt{U_a}}{a \cdot \sqrt{U_M}}, \quad (7.7)$$

где  $b$  - расстояние от линзы до мишени;  
 $a$  - расстояние от кроссовера до линзы;  
 $U_M$  - потенциал мишени второго анода;  
 $r_{\Pi}$  - радиус пятна на мишени.

Если потенциал мишени равен потенциалу анода (анод заземлен), то  $\sqrt{U_a} = \sqrt{U_M}$ , тогда радиус пятна на мишени определится как:

$$r_{\Pi} = r_c \frac{b}{a}. \quad (7.8)$$

## 7.2. Расчет высокопервееансных пушек

В электронных пушках технологического назначения, в основном, используются интенсивные пучки. Мерой интенсивности пучка является первееанс пучка [5].

$$P = \frac{I}{U_a^2}, \quad (7.9)$$

где  $P$  - первееанс;

$I$  – ток пучка;

$U_a$  - ускоряющее напряжение.

В обычных электронно-лучевых приборах первееанс пучков не превышает  $10^{-9}$  а/в<sup>3/2</sup>, и в этом случае действие пространственного заряда не учитывается. Если же первееанс больше  $10^{-8}$  а/в<sup>3/2</sup>, то действие пространственного заряда необходимо учитывать.

Действие пространственного заряда в пучках можно характеризовать тремя факторами:

- 1) расширением пучка в пространстве дрейфа;
- 2) падением потенциала в пучке;
- 3) ограничением тока пучка.

Формирование сильноточных пучков возможно лишь при условии компенсации кулоновского расталкивания внешними электрическими или магнитными полями.

Для формирования интенсивных пучков наибольшее распространение получили пушки Пирса. В пушках Пирса с параллельным пучком электрическое поле, созданное в пространстве, окружающем пучок, должно удовлетворять двум условиям:

1) распределение потенциала вдоль границы должно удовлетворять условию:

$$U(z) = U_a \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^{\frac{4}{3}}; \quad (7.10)$$

2) напряженность поля, нормальная к границе пучка, должна быть равна нулю, т. е. должны отсутствовать силы, приводящие к расширению пучка:

$$\frac{dU}{dz} = 0. \quad (7.11)$$

Выполнение этих условий можно добиться подбором особой формы электродов пушки.

На рисунке 7.4 приведено распределение потенциалов в пушке Пирса, обеспечивающее формирование аксиально-симметричного пучка.

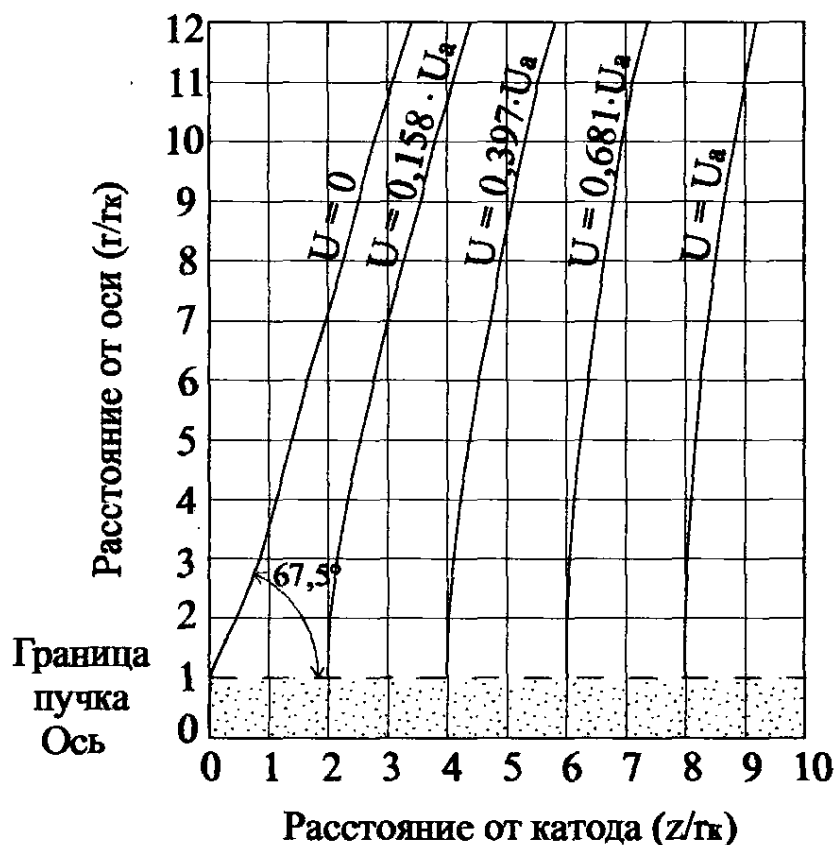


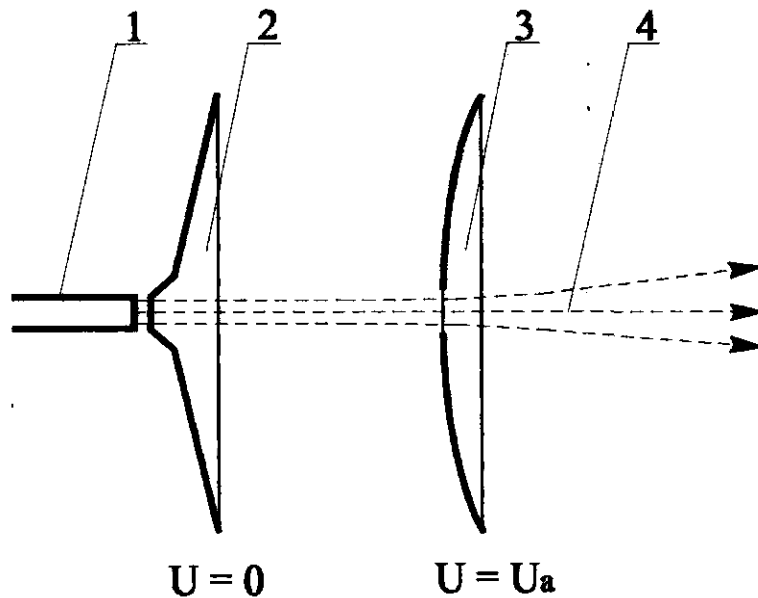
Рис. 7.4. Распределение потенциалов в пушке Пирса

Нулевая эквипотенциаль  $U = 0$  представляет собой поверхность, подходящую к границе пучка под углом  $67,5^\circ$ , а все остальные эквипотенциали подходят к границе пучка под прямым углом. На основании картины поля легко построить пушку, создающую параллельный пучок. Такая пушка содержит плоский катод, катодный (фокусирующий) электрод, имеющий форму нулевой эквипотенциали и анода. Форма анодного электрода соответствует эквипотенциали  $U_a$ .

Чтобы пучок мог пройти за пределы анода, в нем имеется круглое отверстие.

На рисунке 7.5 показана система электродов пушки Пирса для формирования цилиндрического пучка.





1 - катод; 2 - катодный электрод; 3 - анод; 4 - пучок.  
Рис. 7.5. Система электродов, создающая параллельный пучок электронов

Для пушки диодного типа соотношение между током катода, напряжением анода и расстоянием между катодом и анодом имеет следующий вид [8].

$$I_k = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_a^{\frac{3}{2}}}{d^2} \cdot S_k, \quad (7.12)$$

где  $d$  - расстояние анод-катод;

$S_k$  - площадь катода;

$U_a$  - напряжение анода;

$I_k$  - ток катода.

Расстояние между катодом и анодом также рассчитывается по закону степени 3/2.

Наличие отверстия в аноде пушки приводит к расхождению пучка за анодом. Полагая, что напряженность поля за анодом равна нулю, можно определить фокусное расстояние:

$$f = -3 \cdot d. \quad (7.13)$$

Угол расхождения пучка за анодом определим из выражения:

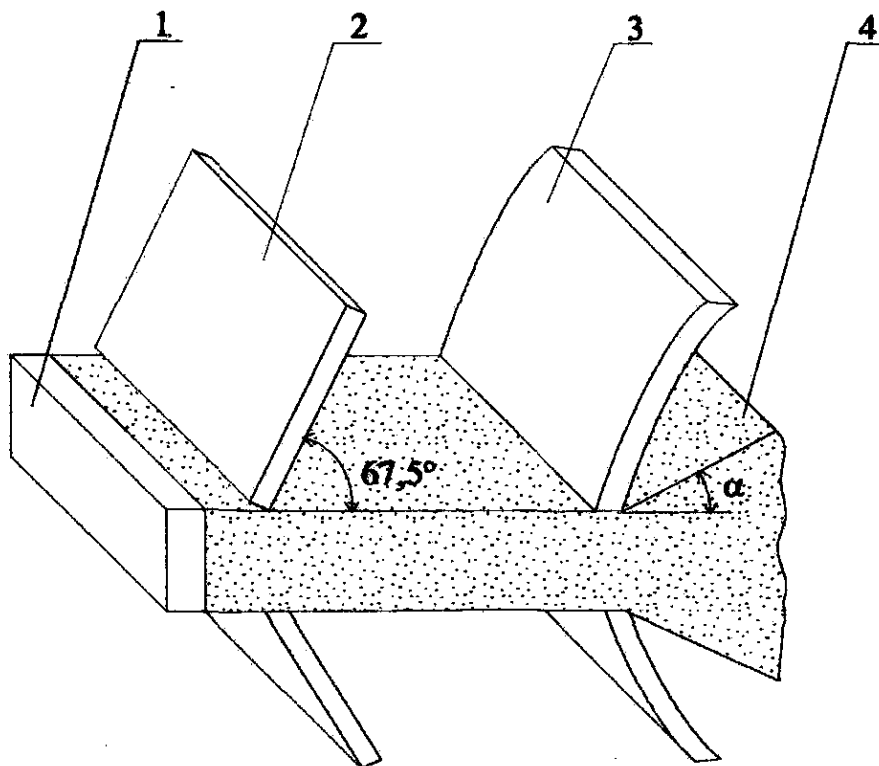
$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{r_a}{3 \cdot d}, \quad (7.14)$$

где  $r_a$  - радиус анодного отверстия.

При выборе катода пушки необходимо учитывать то, что в установках разборного типа, катод неоднократно соприкасается с атмосферой и, следовательно, он не должен терять эмиссионные свойства. Поэтому в таких установках применяются катоды из чистых металлов и боридлантановые катоды [6].

Рабочая площадь катода рассчитывается, исходя из заданного тока катода.

Наряду с пушкой, создающей параллельный цилиндрический пучок электронов, в электронно-лучевых устройствах применяются пушки с ленточным пучком.



1 - катод; 2 - фокусирующий электрод; 3 - анод; 4 - пучок.

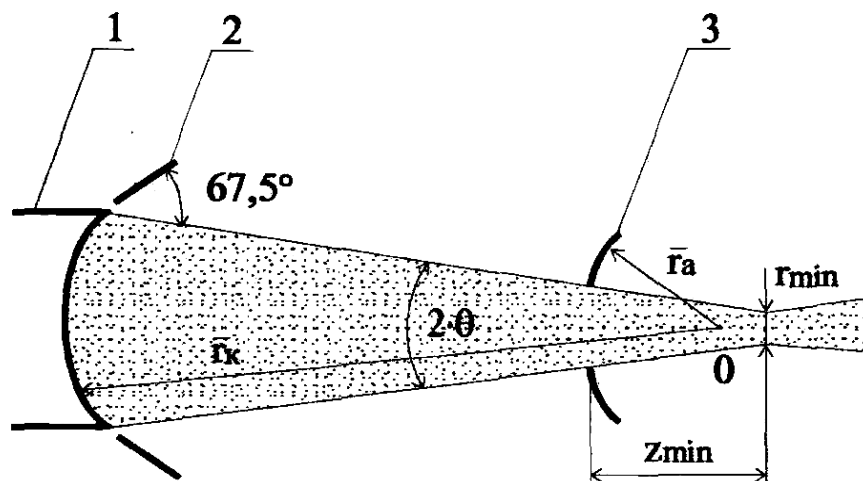
Рис. 7.6. Система пушки Пирса для формирования ленточного пучка

Параллельный ленточный пучок можно сформировать системой Пирса с плоским прямоугольным катодом. Фокусирующий электрод состоит из двух пластин, примыкающих к длинной стороне катода, образующих угол  $67,5^\circ$  с нормалью к поверхности катода. Анод также состоит из двух изогнутых по форме эквипотенциальных пластин, расположенных

друг от друга на расстоянии равном толщине пучка. Эскиз электродов пушки для формирования параллельного ленточного пучка представлен на рисунке 7.6.

Для управления током луча в пушках Пирса фокусирующий электрод изолируют от катода, и на него подается управляющее напряжение. Однако, в пушках Пирса с большим первеансом управление током луча при помощи фокусирующего электрода малоэффективно. Большая эффективность управления током пучка достигается в пушках со специальными управляющими электродами [9].

Для формирования сходящегося аксиально-симметричного пучка используется пушка Пирса сферического типа.



1 - катод; 2 - фокусирующий электрод; 3 - анод.

Рис. 7.7. Пушка Пирса сферического типа

Сходящийся пучок в такой пушке получается вырезанием конической поверхностью части электронного потока, заполняющего пространство между концентрическими сферами. Следовательно, катод пушки имеет вид участка сферы радиуса  $r_k$ , а анод часть сферы с радиусом  $r_a$ . Форма фокусирующего электрода соответствует нулевой эквипотенциали, которая подходит к границе пучка под углом  $67,5^\circ$ .

Анодная эквипотенциаль подходит к границе пучка под прямым углом.

На рисунке 7.7 показана конфигурация электродов пушки сферического типа.

Ток анода сферической пушки определяется законом степени 3/2:

$$I_a = 29,35 \cdot 10^{-6} \frac{1}{[-\alpha(R_a)]^2} \cdot \frac{1 - \cos \theta}{2} \cdot (U_a)^{\frac{3}{2}}, \quad (7.15)$$

где  $R_a = \frac{\bar{r}_k}{r}$ ;

$2 \cdot \theta$  - угол сходимости пучка;

$(-\alpha)^2$  - функция отношения радиусов катодной и анодной сфер;

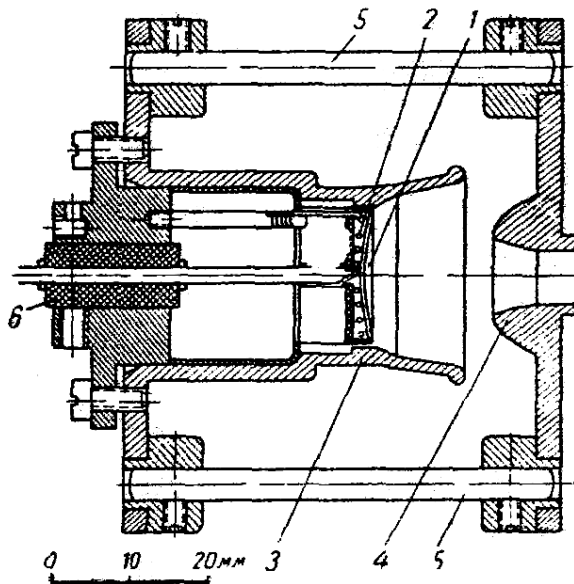
$\bar{r}_k$  - радиус катодной сферы;

$r_a$  - радиус анодной сферы.

Оптимальными являются следующие соотношения:

$$\frac{\bar{r}_k}{r_a} = 2,2; \quad z_{min} = 1,05 \cdot r_k; \quad z_{min} = 0,43 \cdot r_a; \quad \theta = 21 \cdot \sqrt{P}$$

Используя эти соотношения можно произвести расчет геометрии пушки на заданные параметры пучка [9].



1 - катод; 2 - подогреватель; 3 - фокусирующий электрод;  
4 - анод; 5- керамический стержень; 6 - изоляционная втулка.

Рис. 7.8. Экспериментальная электронная пушка Пирса:

$$U_a = 50 \text{ кВ}; \quad K = 0,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$$

На рисунке 7.8 представлен чертеж пушки Пирса для формирования сходящегося пучка.

## 8. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛИНЗЫ

В электронно-оптических системах применяются электронные линзы различного типа. Рассмотрим основные типы электронных линз.

### 8.1. Линза-диафрагма

Линза-диафрагма представляет собой диафрагму с круглым отверстием, помещенным в поле плоского конденсатора. При этом возможны два случая, иллюстрируемые на рисунках 8.1 и 8.2: потенциалы плоских электродов  $U_1$  и  $U_2$ ; потенциал диафрагмы  $U_d$ . В первом случае (рисунок 8.1) напряженность слева от диафрагмы меньше, чем справа от нее. Величины  $U'(z)$  и  $U''(z)$  будут меняться с расстоянием от оси  $z$ . Как следует из рисунка 8.1, в этой линзе  $U''(z) > 0$ , что свидетельствует о том, что линза собирающая. Второй случай (рисунок 8.2) соответствует уменьшению напряженности при переходе через область диафрагмы. Характер распределения потенциала, его первой и второй производных вдоль оси  $z$ , показывает, что в данном случае мы имеем рассеивающую линзу.

Аналитическое выражение для фокусного расстояния линзы-диафрагмы может быть представлено следующим выражением [5]:

$$\frac{1}{f_d} = \frac{1}{4 \cdot U_d} \cdot \int_a^b U''(z) dz, \quad (8.1)$$

где  $U_d$  - потенциал диафрагмы;

$a$ - $b$  - область неоднородного поля линзы.

Распределение потенциала вдоль оси  $z$  для линзы-диафрагмы хорошо описывается выражением:

$$U(z) = U_d + \frac{R}{\pi} (E_1 - E_2) \cdot \left( 1 + \frac{z}{R} \cdot \operatorname{arctg} \frac{z}{R} \right) - \frac{1}{2} (E_1 - E_2) \cdot z, \quad (8.2)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  - значения напряженности полей слева и справа от диафрагмы;

$R$  - радиус отверстия диафрагмы.

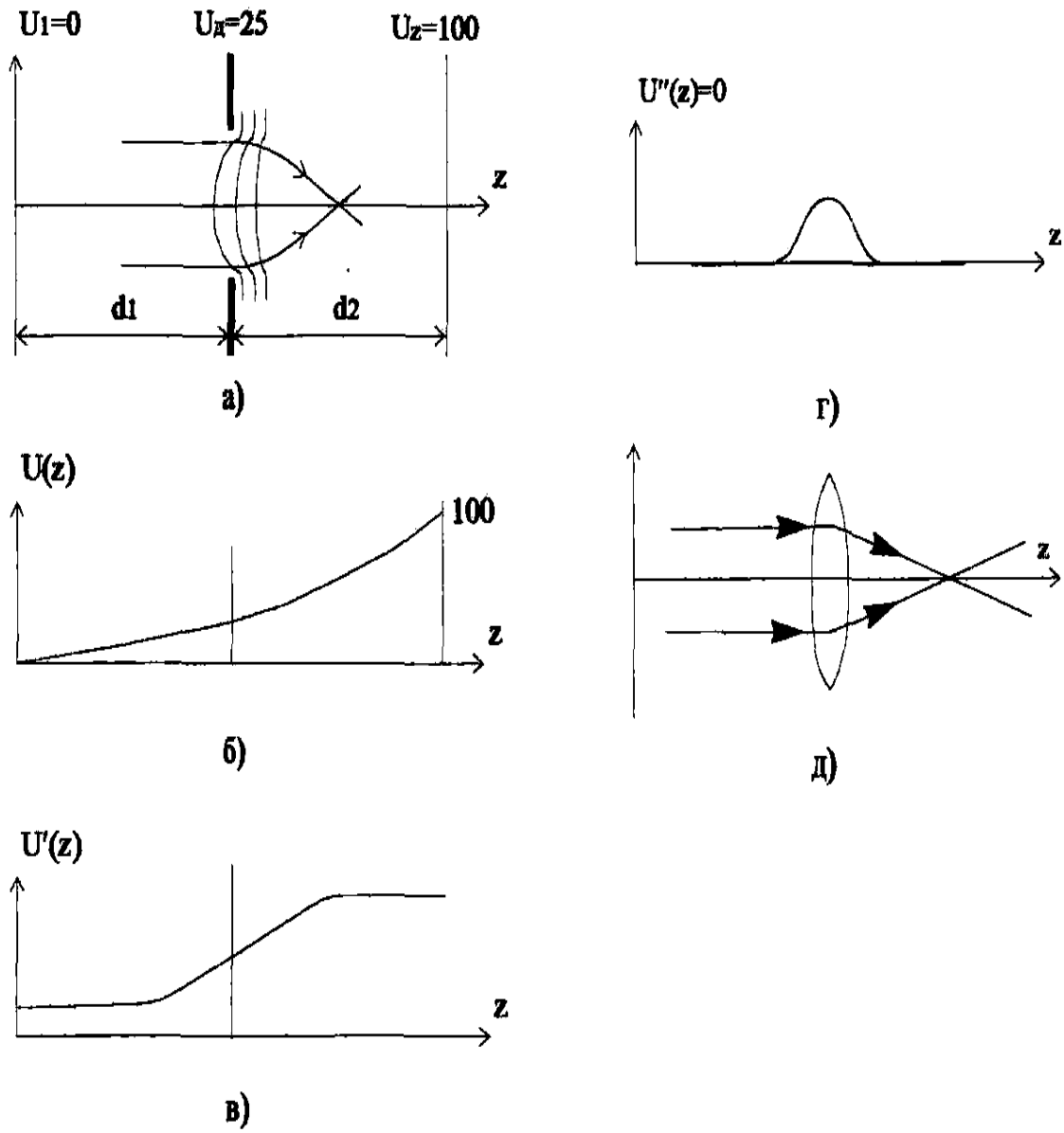


Рис. 8.1. Собирающая линза-диафрагма

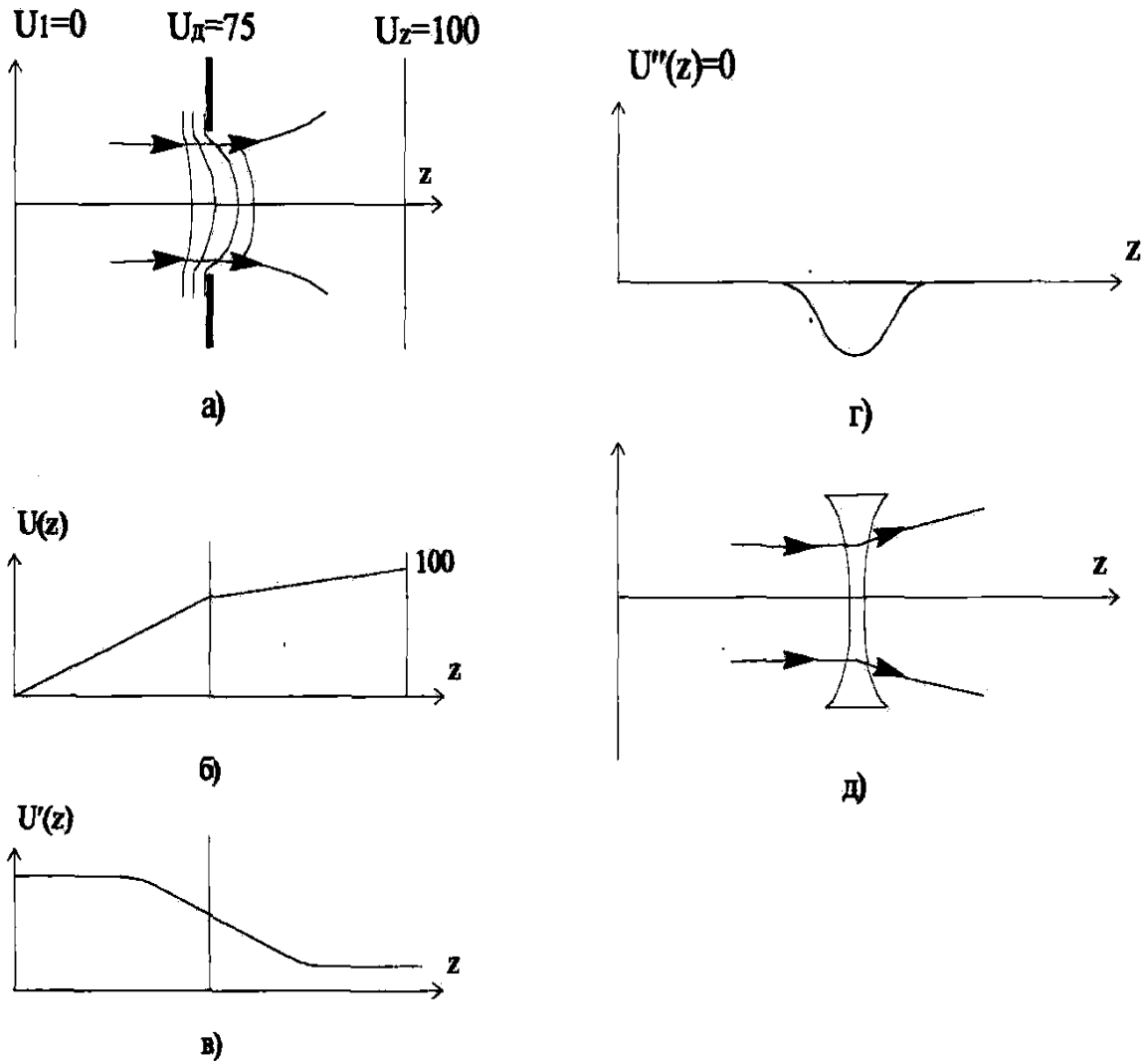


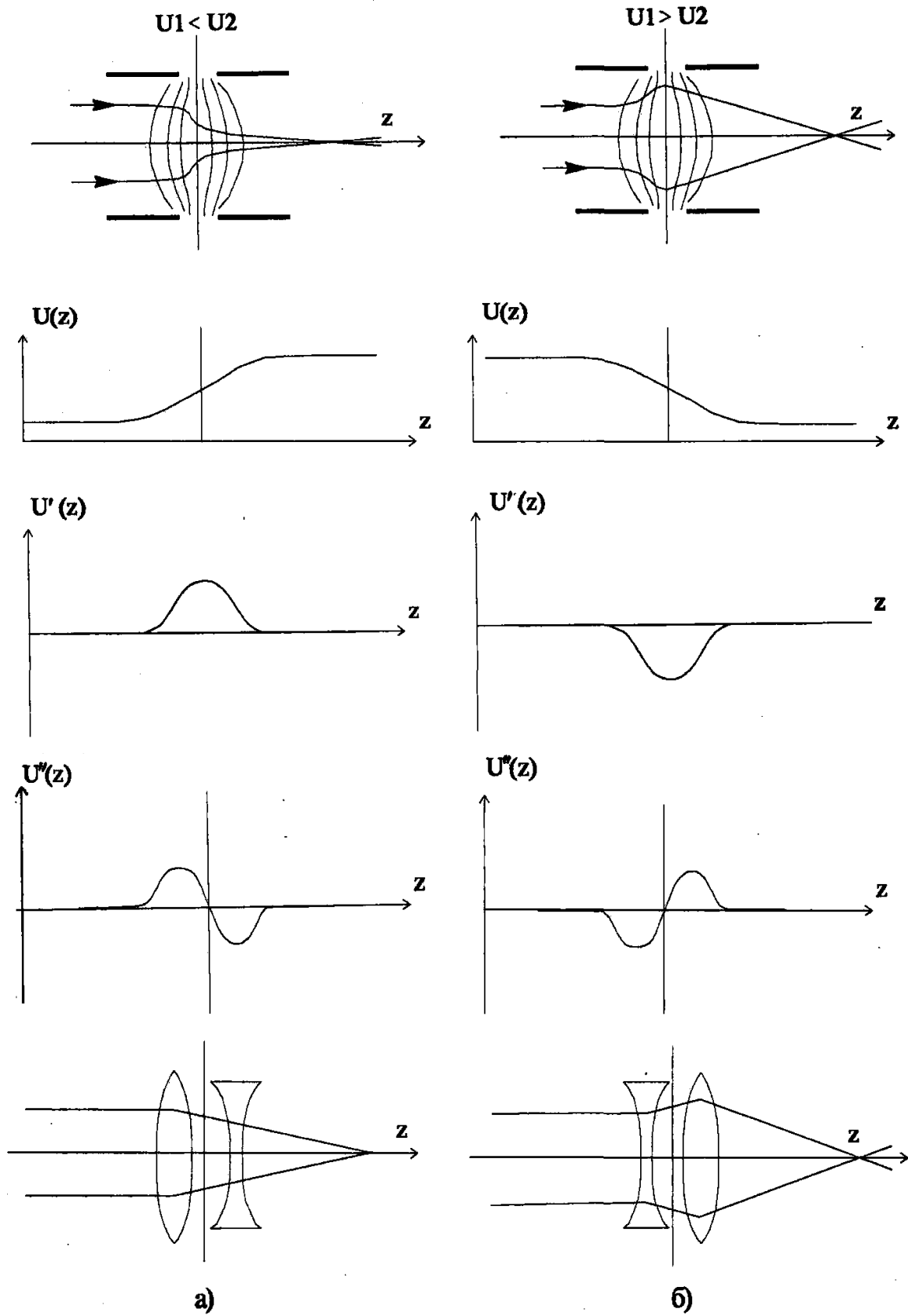
Рис. 8.2. Рассеивающая линза-диафрагма

## 8.2. Иммерсионная линза

Иммерсионная линза образуется двумя цилиндрами или диафрагмами с разными потенциалами. Между электродами, образующими линзу, образуется аксиально-симметричное поле, являющееся электронной линзой. Здесь возможны два случая, а именно: потенциал второго электрода  $U_2$  больше потенциала; первого  $U_1$ , и второй случай, когда,  $U_2 < U_1$ .

Характер изменения потенциала и его первой и второй производных по оси симметрии линзы для обоих случаев представлен на рисунке 8.3.

Можно отметить свойства иммерсионных линз. Во-первых, эти линзы являются всегда собирающими. Во-вторых, они несимметричны, т.е. их фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  не равны.



а - для случая  $U_2 > U_1$  ; б - для случая  $U_2 < U_1$ .

Рис. 8.3. К анализу иммерсионной линзы



Так как по обе стороны линзы лежат области с разными потенциалами, то она может служить не только для фокусировки, но и для ускорения или замедления электронов.

Для фокусного расстояния пространства объектов справедлива формула [5]:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{U_a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U''(z)}{\sqrt{U(z)}} dz, \quad (8.3)$$

Для фокусного расстояния пространства изображений справедливо выражение:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{U_0}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U''(z)}{\sqrt{U(z)}} dz, \quad (8.4)$$

Для линзы, образованной двумя цилиндрами равного диаметра, отстоящими друг от друга на расстоянии меньше диаметра, распределение потенциала вдоль оси  $z$  хорошо аппроксимируется выражением:

$$U(z) = \frac{U_1 + U_2}{2} + \frac{U_2 - U_1}{2} \cdot \text{th} \frac{2,63}{D} \cdot z. \quad (8.5)$$

### 8.3. Иммерсионный объектив

Иммерсионный объектив представляет собой комбинацию иммерсионной линзы с источником электронов - катодом. На рисунке 8.4 представлен фокусирующий иммерсионный объектив, состоящий из катода, модулятора и анода. Здесь также показаны распределение потенциала вдоль оси симметрии и оптический эквивалент этой линзы.

Как видно из рисунка, поле в области модулятора будет фокусировать электронный пучок, а поле в области анода будет оказывать рассеивающее действие. Общее действие иммерсионного объектива будет собирающим, так как в первой области скорости электронов меньше скоростей электронов, подходящих к рассеивающей области.

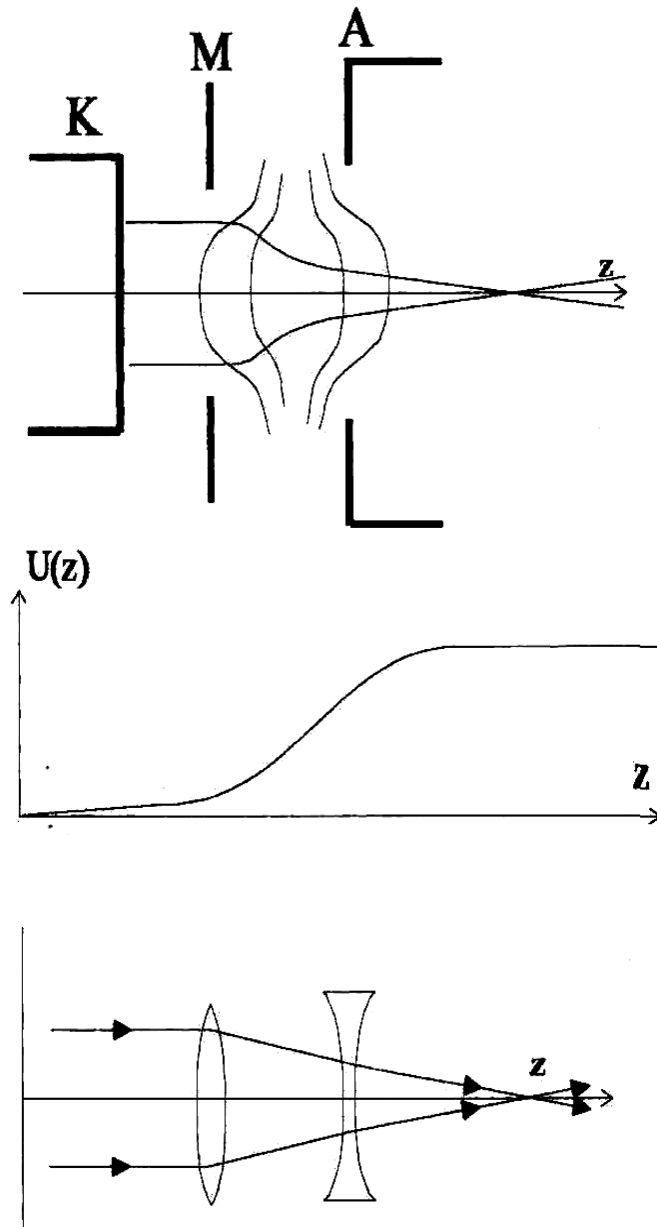


Рис. 8.4. Иммерсионный объектив

Оптическую силу иммерсионного объектива можно менять, изменяя соотношения потенциалов анода и модулятора. Иммерсионный объектив используется и для управления величиной тока пучка электронов.

Более подробно иммерсионный объектив рассмотрен в разделе 7 настоящего пособия.

## 8.4. Симметричная линза

Симметричная линза образуется различными комбинациями трех цилиндров и диафрагм. В электронной оптике под симметричной линзой понимают область аксиально-симметричного электрического поля, у которого потенциалы справа и слева от линзы постоянны и равны между собой. Симметричная линза всегда собирающая и кроме того, она симметрична, т.е.  $f_1 = f_2$ . В противоположность иммерсионной линзы, симметричная линза не изменяет энергию электронного пучка.

На рисунке 8.5 представлены два случая распределения потенциала вдоль оси симметрии, а также первой и второй производных. Для линзы образованной цилиндрами равных радиусов  $R$  длине среднего цилиндра  $L$ , распределение потенциала вдоль оси  $z$  представлено в виде:

$$U(z) = U_1 - \frac{(U_1 - U_2) \cdot \operatorname{sh} \frac{1,3 \cdot L}{R}}{\operatorname{ch} \frac{1,3 \cdot L}{R} - \frac{2,6}{R} \cdot z}. \quad (8.6)$$

Зазор между цилиндрами меньше радиуса  $R$ .

На практике симметричную линзу используют при  $U_2 < U_1$ , т.е. крайние электроды имеют более высокий потенциал. Такое соотношение выгодно по двум причинам. Во-первых, для питания среднего электрода не требуется дополнительный высоковольтный источник напряжения. Во-вторых, при  $U_1 > U_2$  линза обладает меньшими aberrациями т.к. в этом случае собирающая область лежит вблизи средней плоскости линзы и, следовательно, внутри линзы пучок имеет меньший диаметр.

Для фокусного расстояния линзы справедливо соотношение [5]:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{U}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U''(z)}{\sqrt{U(z)}} dz. \quad (8.7)$$

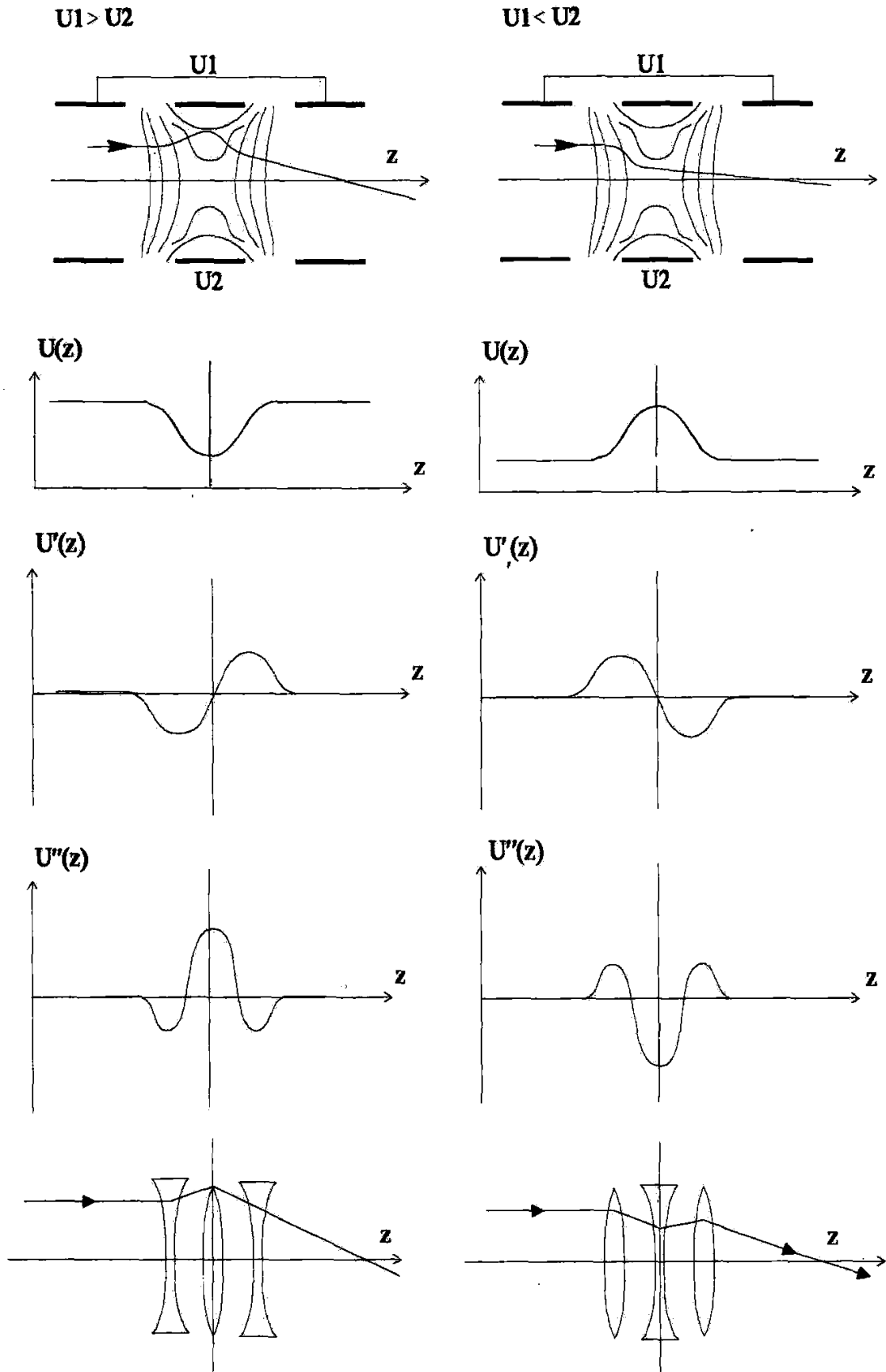


Рис.8.5. К анализу симметричной линзы

## 8.5. Магнитная линза

Магнитная линза представляет собой короткий соленоид, поле которого сосредоточено на небольшом участке вдоль траектории электрона. Магнитные линзы всегда симметричные. Формула тонкой магнитной линзы может быть записана в виде:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}, \quad (8.8)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - расстояние от объекта до исходной плоскости линзы и от этой плоскости до изображения.

Магнитное поле на участке линзы не постоянно, а изменяется, как в направлении  $z$ , так и в направлении радиуса, причем наличие радиальной составляющей поля является необходимым условием его фокусирующего действия.

Распределение магнитной индукции на оси короткой катушки со средним радиусом намотки определяется по формуле:

$$B(z) = \frac{\mu_0 \cdot R_{cp}^2 \cdot n \cdot I}{2 \cdot \left( (R_{cp})^2 + z^2 \right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (8.9)$$

где  $n$  - число витков в катушке;

$I$  - ток катушки;

$R_{cp}$  - средний радиус катушки.

Если в формуле 8.9 значение тока в амперах, а  $R_{cp}$  и  $z$  в метрах, то магнитная индукция будет иметь размерность тесла.

Фокусное расстояние такой магнитной линзы можно рассчитать по формуле:

$$f = 100 \cdot \frac{U_0 \cdot R_{cp}}{(n \cdot I)^2}, \quad (8.10)$$

где  $U_0$  - ускоряющее напряжение.

Угол поворота изображения определяется следующим выражением:

$$\varphi = 10,7 \cdot \frac{n \cdot I}{\sqrt{U_0}}. \quad (8.11)$$

В формулах 8.10 и 8.11 следует подставлять значения  $U_0$  в вольтах,  $I$  - в амперах,  $R$  - в сантиметрах, тогда значение  $f$  получится в сантиметрах, а  $\varphi$  - в градусах.

Для получения короткофокусной линзы желательно, увеличивая оптическую силу поля, уменьшать протяженность этого поля вдоль оси симметрии. Сокращения продольного размера линзы можно добиться, если поместить катушку в железный экран с узкой щелью. Такая линза показана на рисунке 8.6.

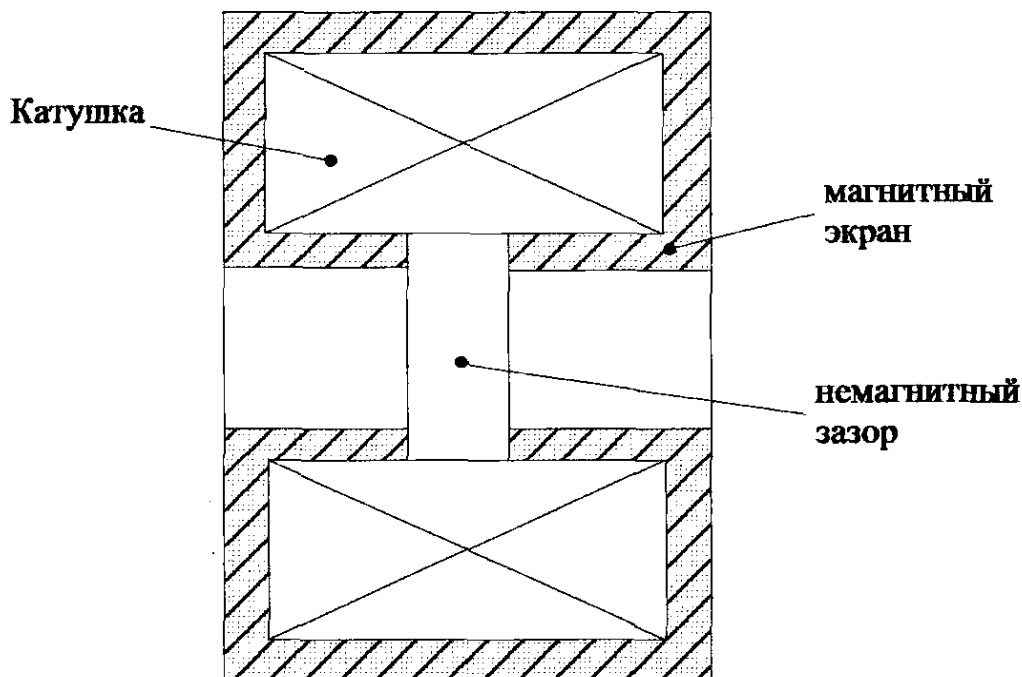


Рис. 8.6. Магнитная линза

Магнитное поле концентрируется в области кольцевой щели и продольный размер линзы резко уменьшается. Сокращение продольного размера поля линзы сопровождается ростом индукции магнитного поля при тех же ампер-витках, создающих линзу. Очень сильные магнитные линзы с фокусными расстояниями порядка миллиметра можно создать путем введения полюсных наконечников. Такие линзы находят применение в электронных микроскопах.

### 8.6 Тепловой расчет тигля

Для проведения теплового расчета зададимся некоторыми физическими параметрами материала рабочего вещества: плотность ( $\rho$ ); удельная теплота плавления ( $\lambda$ ); удельная теплоемкость ( $c$ ) и температура плавления ( $T$ ).

Рассчитаем количества тепла, которое потребуется для расплавления рабочего вещества :

$$Q_1 = c \cdot m \cdot \Delta T + m \cdot \lambda$$

Рабочее вещество в процессе плавки находится в тигле. Тигель в свою очередь тоже нагревается до температуры плавления рабочего вещества, на что требуется дополнительная мощность. Так же нужно учесть охлаждение за счет теплового излучения стенок тигля и поверхности расплавленного металла.

Приступим к выбору и расчету геометрии тигля. Тигель может быть выполнен из вольфрама, молибдена, вольфраммолибденового сплава. В нашем случае материалом тигля будет служить вольфрам, т.к. этот металл обладает наименьшим давлением паров при нагреве. Держатель тигля так же выполнен из вольфрама.

Объем и размеры тигля рассчитаем с учетом объема расплавленного рабочего вещества ( $V$ ). Зная этот объем, можно задаться размерами тигля. (рис. 8.7,а).

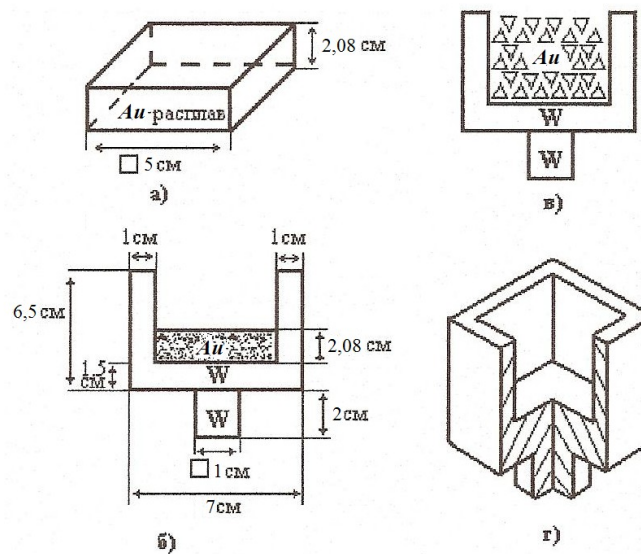


Рис. 8.7 Конструкция тигля:

а) Вид Au в расплавленном виде б) размеры тигля в) загрузка исходным материалом г) общий вид тигля.

В плавильных установках в качестве исходного материала используется не цельный металл, а его стружка, дробленые куски и т.д. (рис. 8.7,в)

В связи с этим принято считать, что объем тигля должен быть примерно в три раза большим, чем объем расплавленного в итоге металла. Т.е. металл после расплавления будет занимать объем приблизительно равный 30-40% от общего объема тигля.

Теперь, зная размеры тигля, можно рассчитать площадь теплового излучения тигля и рабочего вещества, расположенного в нем.

Площадь излучающей поверхности золота будет складываться только с открытой поверхностью.

Площадь излучающей поверхности вольфрама будет складываться из следующих величин: площади внешней поверхности ( $S_1$ ); площади ребер ( $S_2$ ); площади внутренней поверхности тигля ( $S_3$ ); площади дна ( $S_4$ ) и площадь держателя ( $S_5$ ). Общая площадь  $S_w$ .

Найдем количество тепла, которое необходимо для нагрева вольфрама до температуры плавления рабочего вещества:

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \Delta T.$$

Зная геометрию тигля, вычислим объем вольфрама, из которого тигель изготовлен. Объем будет складываться из следующих величин:

1)  $V_1$  - объем донной части;

2)  $V_2$  - объем стенок тигля.

Общий объем:  $V = V_1 + V_2$

Плотность вольфрама  $\rho = 19,1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; удельная теплоемкость  $c = 134 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Таким образом:

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \Delta T = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T$$

Далее зададим время технологического процесса  $t$  и вычислим мощность теплового излучения с поверхностей металлов ( $W$  и рабочего вещества), выделившуюся за это время:

1) Мощность, излучаемая с поверхности рабочего вещества:

$$P_{\text{раб}} = \xi \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S_{\text{раб}},$$

где  $\xi$  - интегральный коэффициент излучения рабочего вещества;

$\sigma = 5,62 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}$  - постоянная Больцмана;

$T$  - температура плавления рабочего вещества.

$S_{\text{раб}}$  - площадь излучающей поверхности рабочего вещества.

Количество теплоты с учетом времени технологического про-



цесса:

$$Q_3 = P_{раб} \cdot t.$$

2) Мощность, излучаемая с поверхности вольфрама:

$$P_W = \xi \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S_W, \text{ (при } \xi_W = 0,27 \text{ )};$$

Количество теплоты с учетом времени технологического процесса:

$$Q_4 = P_W \cdot t.$$

2) Количество теплоты, передаваемое вольфраму:

3)

$$Q_5 = \frac{\lambda \cdot S_{сеч} \cdot \Delta T \cdot t}{l},$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала

$$\lambda_W = 1,138 \frac{Вт}{см \cdot К};$$

$S_{сеч}$  - поперечное сечение проводника тепла;

$l$  - длина проводника тепла.

Теперь можно сложить все количество теплоты, которое требуется, чтобы расплавить необходимое количество рабочего вещества в вольфрамовом тигле за время равное 1 мин.

$$Q_{ти} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

Далее вычислим мощность электронного потока по формуле:

$$P = I \cdot U,$$

где  $I$  - ток луча;

$U$  - ускоряющее напряжение.

Используя время технологического процесса, определим то количества тепла, которое отдает электронный поток:

$$Q_{п} = P \cdot t.$$

Сравним количество тепла, которое потребуется для плавления титана  $Q_{ти}$  и количество тепла, которое отдает электронный поток  $Q_{п}$ , делаем вывод, что в случае когда  $Q_{ти} \geq Q_{п}$ , количество теп-

ла отдаваемого электронным лучом достаточно для того, чтобы расплавить рабочее вещество.

Тепловой расчет и конструкция тигля представлено в приложении 4.

В приложении 5 представлены чертежи отдельных узлов электронно-лучевых установок.

## 9. Расчет параметров параксиальных траекторий электронов в осесимметричных электрическом и магнитном полях в среде программного пакета "MATHCAD 6.0 PLUS"

### 9.1. Введение

С математической точки зрения траектория движения электрона в аксиальных электрическом  $\vec{E}(z, r)$  и магнитном  $\vec{B}(z, r)$  полях есть функция  $r(z)$ , позволяющая рассчитать расстояние  $r$  до электрона от оси симметрии в произвольной координате  $z$  этой оси [13]. В параксиальной области эта функция должна удовлетворять обыкновенному однородному линейному дифференциальному уравнению второго порядка с переменными коэффициентами:

$$\frac{d^2 r(z)}{dz^2} + \frac{1}{2U_0(z)} \frac{dU_0(z)}{dz} \frac{dr(z)}{dz} + \left[ \frac{1}{4U_0(z)} \frac{d^2 U_0(z)}{dz^2} + \frac{e}{8mU_0(z)} B(z)^2 \right] r(z) = 0, \quad (9.1)$$

где  $U_0(z)$  и  $B(z)^2 = \vec{B}(z,0) \cdot \vec{B}(z,0)$  - распределение электрического потенциала и скалярный квадрат вектора магнитной индукции, соответственно, на оси симметрии;  $e$  и  $m$  абсолютная величина заряда ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) и массы ( $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг) электрона, соответственно.

В данной постановке задачи расчет траектории движения электрона сводится к решению задачи Коши [14] для дифференциального уравнения 9.1 с некоторыми начальными условиями:

$$\begin{cases} r(0) = r_0 \\ \left. \frac{dr(z)}{dz} \right|_{z=0} = r'(0) = r'_0 \end{cases}, \quad (9.2)$$

Очевидно, величина  $r_0$  есть расстояние электрона от оси симметрии в некоторой начальной точке  $z = 0$ ,  $r'_0$  есть тангенс угла наклона траектории к оси симметрии в этой точке.

Часто, в практически важных случаях, аналитическое решение поставленной задачи в виде элементарных функций невозможно. Поэтому в инженерно-технических расчетах приходится решать уравнение 9.1 численно.

Существует несколько эффективных алгоритмов для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений разрешенных относительно старшей производной, т. е. представимых в виде:

$$\frac{d^n f(x)}{dx^n} = G\left(\frac{d^n f(x)}{dx^n}, \frac{d^{n-1} f(x)}{dx^{n-1}}, \dots, \frac{df(x)}{dx}, f(x), x\right) + F(x), \quad (9.3)$$

где  $G\left(\frac{d^n f(x)}{dx^n}, \frac{d^{n-1} f(x)}{dx^{n-1}}, \dots, \frac{df(x)}{dx}, f(x), x\right)$  - некоторая, в общем случае нелинейная функция своих аргументов, а  $F(x)$  - заданная функция, соответствующая внешней силе, действующей на физическую систему описываемую уравнением 9.3 (в сформулированной выше задаче расчета траектории  $F(x) = 0$ ).

К этим алгоритмам можно отнести:

- 1) метод Эйлера (метод ломанных);
- 2) модифицированный метод Эйлера;
- 3) метод Рунге-Куты (различных порядков);
- 4) метод Bulisch-Stoer;
- 5) методы с адаптированным к скорости изменения решения выбором шага численного интегрирования; и многие другие методы.

Перечисленные выше алгоритмы реализованы в виде отдельных подпрограмм в пакете "Mathcad 6.0 PLUS" [15] и вызываются при помощи специальных операторов, требующих задания некоторых параметров, контролирующих точность расчета, и функций, соответствующих решаемому уравнению. Эти методы реализованы для систем дифференциальных уравнений первого порядка разрешенных относительно производных:

$$\begin{cases} \frac{dy_1(x)}{dx} = G_1(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) + F_1(x) \\ \vdots \\ \frac{dy_N(x)}{dx} = G_N(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) + F_N(x) \end{cases}, \quad (9.4)$$

где функции  $G_n(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x)$  и  $F_n(x)$  имеют тот же смысл, что и

функции  $G\left(\frac{d^n f(x)}{dx^n}, \frac{d^{n-1} f(x)}{dx^{n-1}}, \dots, \frac{df(x)}{dx}, f(x), x\right)$  и  $F(x)$  в уравнении 9.3.

Алгоритм численного решения системы 9.4 может быть без труда адаптирован к численному решению уравнения 9.3 или, как частный случай, уравнения 9.1. Для этого достаточно ввести следующие обозначения:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(x) = y_1(x) \\ \frac{df(x)}{dx} = y_2(x) \\ \vdots \\ \frac{d^{N-1} f(x)}{dx^{N-1}} = y_N(x) \end{array} \right. , \quad (9.5)$$

Тогда уравнение 9.3 можно переписать в виде следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_1(x)}{dx} = y_2(x) \\ \frac{dy_2(x)}{dx} = y_3(x) \\ \vdots \\ \frac{dy_{N-1}(x)}{dx} = y_N(x) \\ \frac{dy_N(x)}{dx} = G(y_N(x), \dots, y_2(x), y_1(x), x) + F(x) \end{array} \right. , \quad (9.6)$$

которая имеет вид общей системы 9.4 при условии, что

$$G_1(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) = y_2(x),$$

$$G_2(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) = y_3(x), \dots,$$

$$G_{N-1}(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) = y_N(x),$$

$$G_N(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) = G(y_N(x), \dots, y_2(x), y_1(x), x).$$

В частности уравнение 9.1, которое необходимо решить для расчета параксиальной траектории электрона эквивалентно следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dr(z)}{dz} = r'(z) \\ \frac{dr'(z)}{dz} = \frac{-1}{2U_0(z)} \frac{dU_0(z)}{dz} r'(z) - \left[ \frac{1}{4U_0(z)} \frac{d^2U_0(z)}{dz^2} + \frac{e}{8mU_0(z)} B(z)^2 \right] r(z) \end{cases} \cdot (9.7)$$

## 9.2. Оператор rkfixed( $\vec{y}, x_{\min}, x_{\max}, M, \vec{D}$ )

Подпрограмма, вызываемая этим оператором реализует алгоритм решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных, выражение 9.4, методом Рунге-Куты четвертого порядка. Аргументами этого оператора являются:

$$1) \vec{y} = \begin{bmatrix} y_1(x_{\min}) \\ y_2(x_{\min}) \\ \vdots \\ y_N(x_{\min}) \end{bmatrix} - \text{вектор начальных условий;}$$

2)  $x_{\min}$  - начальное значение аргумента из интервала, на котором производится численное интегрирование;

3)  $x_{\max}$  - конечное значение аргумента из интервала на котором производится численное интегрирование;

4)  $M$  - число точек, не считая начальной, в которой имеется приближенное решение. Величина  $M$  позволяет контролировать точность полученного решения. Чем больше значение  $M$  тем точнее решение. На практике находят приближенное решение при некотором значении  $M$  затем либо увеличивают, либо уменьшают его до тех пор, пока следующее решение не будет отличаться от предыдущего с заданной точностью (не наступит режим насыщения точности либо не произойдет выход из этого режима);

$$5) \vec{D} = \begin{bmatrix} G_1(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) + F_1(x) \\ G_2(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) + F_2(x) \\ \vdots \\ G_N(y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x), x) + F_N(x) \end{bmatrix} - \text{вектор}$$

первых производных неизвестных функций.

По команде этого оператора "Mathcad 6.0 PLUS" возвращает матрицу состоящую из  $N$  столбцов и  $M$  строк.

6) первый столбец этой матрицы содержит последовательные значения аргумента из интервала численного интегрирования системы;

7) последующие столбцы содержат значения искомых функций, соответствующие аргументам, содержащимся в первом столбце. Для иллюстрации работы этого оператора рассмотрим в качестве примера расчет траектории движения электрона в аксиально-симметричном магнитном поле, которое создается короткой катушкой со средним радиусом  $R_{cp} = 40$  мм, длиной  $L = 20$  мм, числом ампер-витков  $J \cdot N = 800$ . Ускоряющее напряжение при этом будем считать равным  $U_0 = 14$  кВ.

Для расчета траектории электрона в этом случае можно использовать систему уравнений 9.7, которая для не зависящего от координат ускоряющего напряжения переписывается в форме:

$$\begin{cases} \frac{dr(z)}{dz} = r'(z) \\ \frac{dr'(z)}{dz} = -\frac{e}{8mU_0} B(z)^2 r(z) \end{cases} \quad (9.8)$$

Величина вектора магнитной индукции на оси катушки дается выражением:

$$B(z) = \frac{\mu_0 R_{cp}^2 NJ}{2(R_{cp}^2 + (z - z_u)^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (9.9)$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - фундаментальная магнитная постоянная координата центра катушки.

В приложении 1 представлен листинг программы для решения этой системы с начальными условиями  $r_0 = 5$  мм и  $r_0' = 0$ .

Отметим следующие особенности, которые необходимо учитывать при составлении и редактировании подобных программ.

1) По умолчанию нумерация первого элемента вектора начинается с нуля. Для изменения этого значения необходимо встроенной переменной "ORIGIN" присвоить удобное для Вас значение.

2) Перед расчетами необходимо провести анализ размерностей физических величин и привести их в единую систему. Это можно сделать

средствами "Mathcad 6.0 PLUS".

3) "Mathcad 6.0 PLUS" последовательно, слева направо и сверху вниз, просматривает вашу программу. Потому все переменные и функции используемые для расчета в некотором выражении должны быть заданы перед этим выражением;

4) при задании вектора первых производных  $\vec{D}$  за пределами оператора **rkfixed** необходимо указывать его функциональную зависимость от аргумента и от вектора искомых функций  $\vec{y}$ , т. е. писать  $D(x,y)$ . При указании имени этого вектора как аргумента оператора **rkfixed**, эту зависимость указывать не надо, т. е. необходимо в скобках за **rkfixed** писать просто  $D$ ;

5) для визуального просмотра результатов расчета на графике необходимо задавать текущий номер строки;

6) при анализе полученного решения необходимо постоянно помнить соответствие между физическими величинами и переменными "Mathcad 6.0 PLUS".

Заметим, что перед численным решением дифференциального уравнения желательно провести качественный анализ поведения его интегральных кривых от различных параметров. Так в рассмотренном примере представляет интерес зависимость решения от начальных условий. Из уравнений 9.7 следует симметрия решений относительно оси катушки, полученных при одинаковых по величине, но разных по знаку начальных условиях. Поэтому если найдено решение при начальных условиях 9.2, то для получения решения, соответствующего начальным условиям с противоположным знаком достаточно изменить знак у первоначального решения, что и сделано в представленном листинге программы.

Представленная в Приложении 1 программа предназначена для расчета траектории электрона влетающего в область катушки параллельно ее оси на расстояние  $r_0$  от этой оси.

В Приложении 2 представлен листинг программы, предназначенной для расчета траекторий электронов, находящихся в начальной точке на различном расстоянии от оси катушки. Для задания полученного решения как функции величины начальных условий используется программный блок "Mathcad 6.0 PLUS" [15].

В заключение этого пункта заметим, что рассмотренные примеры использования оператора **rkfixed** не являются универсальными. При анализе конкретной инженерно-технической задачи использование этого оператора основано на индивидуальном подходе инженера, решающего

эту задачу. Может случиться, что дифференциальное уравнение не может быть решено при помощи этого оператора. Тогда надо либо проводить дополнительный теоретический анализ и упрощать постановку задачи численного интегрирования, либо отказываться от использования "Mathcad 6.0 PLUS" и применять другие программные средства.



## Приложение 1

origin := 1

Задание числа, с которого начинается нумерация координат вектора. По умолчанию эта нумерация начинается с нуля.

$e := 1,6 \cdot 10^{-19}$

Абсолютная величина заряда электрона

$m := 9,1 \cdot 10^{-31}$

Масса электрона

$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

Фундаментальная магнитная постоянная

$R_{cp} := 40 \cdot 10^{-3}$

Средний радиус катушки

$L := 20 \cdot 10^{-3}$

Средняя длина катушки

$JN := 800$

Число ампер витков

$U_0 := 14 \cdot 10^3$

Ускоряющая разность потенциалов

$z_{ц} := 0$

Координата центра катушки

$$B(z) := \frac{\mu_0 \cdot R_{cp}^2 \cdot JN}{2 \cdot \left[ R_{cp}^2 + (z - z_{ц})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Выражение для величины вектора магнитной индукции

$$R := \begin{pmatrix} -5 \cdot 10^{-3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Вектор начальных условий

$z_{\min} := z_{ц} - L \cdot 10$

Начальная координата из интервала численного интегрирования

$z_{\max} := z_{ц} + L \cdot 10$

Конечная координата из интервала численного интегрирования

$M := 1000$

Количество точек, не считая начальной, в которых ищется численное решение

$$D(z, R) := \begin{pmatrix} R^2 \\ -\frac{e \cdot B(z)^2}{8m \cdot U_0} \cdot R_1 \end{pmatrix}$$

Вектор первых производных

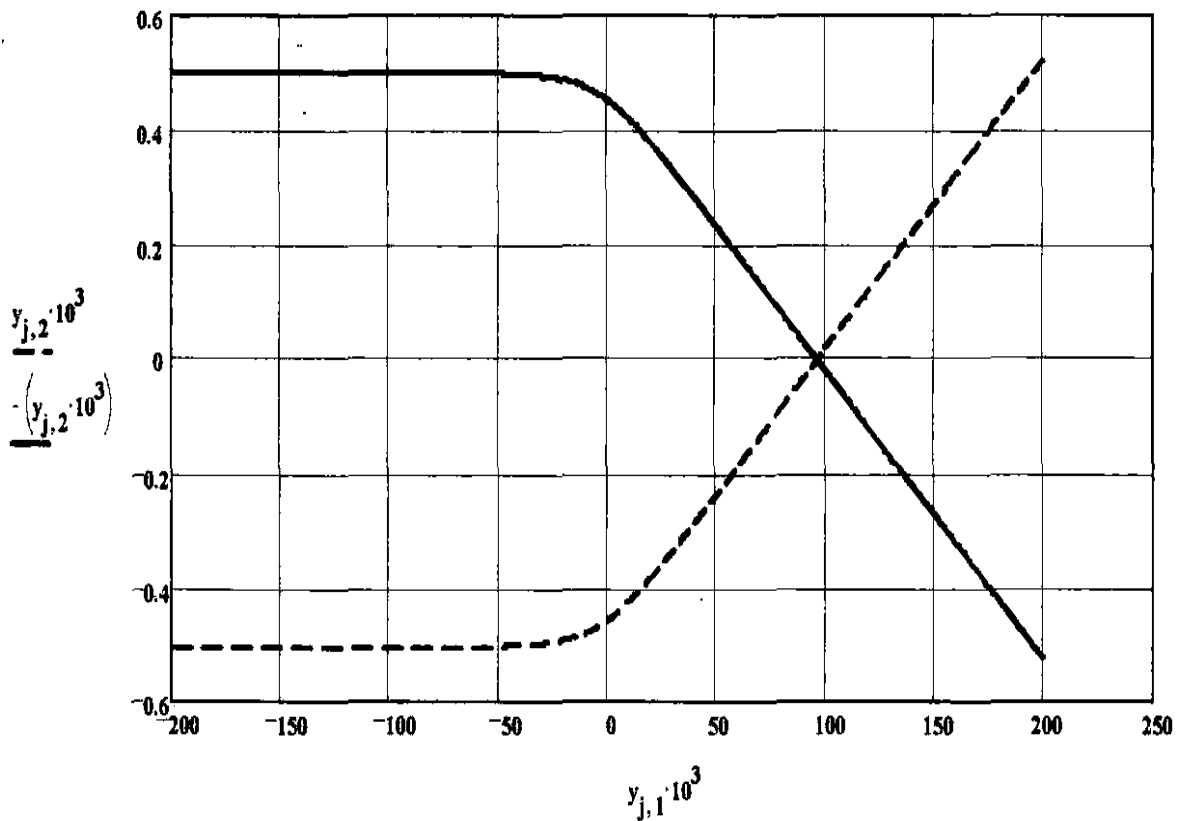
$$y := \text{rkfixed}(R, z_{\min}, z_{\max}, M, D)$$

Присвоение величине  $y$  значений матрицы, содержащей результаты численного решения

$$j := 1 \dots \text{rows}(y)$$

Задание текущего номера строки матрицы  $y$

График зависимости  $r(z)$  с начальными условиями  $r_0=5$  мм (сплошная кривая) и  $r_0=-5$  мм (пунктирная кривая) при начальном значении первой производной  $rz=0$  мм



## Приложение 2

origin := 1

Задание числа, с которого начинается нумерация координат вектора. По умолчанию эта нумерация начинается с нуля.

$e := 1,6 \cdot 10^{-19}$

Абсолютная величина заряда электрона

$m := 9,1 \cdot 10^{-31}$

Масса электрона

$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

Фундаментальная магнитная постоянная

$R_{cp} := 40 \cdot 10^{-3}$

Средний радиус катушки

$L := 20 \cdot 10^{-3}$

Средняя длина катушки

$JN := 800$

Число ампер витков

$U_0 := 14 \cdot 10^3$

Ускоряющая разность потенциалов

$z_{ц} := 0$

Координата центра катушки

$$B(z) := \frac{\mu_0 \cdot R_{cp}^2 \cdot JN}{2 \cdot \left[ R_{cp}^2 + (z - z_{ц})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Выражение для величины вектора магнитной индукции

$z_{min} := z_{ц} - L \cdot 10$

Начальная координата из интервала численного интегрирования

$z_{max} := z_{ц} + L \cdot 10$

Конечная координата из интервала численного интегрирования

$M := 1000$

Количество точек, не считая начальной, в которых ищется численное решение

$$D(z, R) := \left( \begin{array}{c} R_2 \\ -e \cdot B(z)^2 \\ \frac{8m \cdot U_0}{R_1} \end{array} \right)$$

Вектор первых производных

$$\Delta r := 1 \cdot 10^{-3}$$

Шаг изменения начальных условий

$$t := 1 \dots 10$$

Текущий номер, задающий величину начального условия

Ниже представлен фрагмент программы решения дифференциального уравнения в зависимости от величины начального условия. Этот фрагмент использует программный блок пакета Mathcad 6.0 PLUS.

Изменяющийся вектор начальных условий

$$y(t) := \begin{cases} R \leftarrow \begin{pmatrix} \Delta r \cdot t \\ 0 \end{pmatrix} \\ y \leftarrow \text{rkfixed}(R, z_{\min}, z_{\max}, M, D) \end{cases}$$

Присвоение величине  $y$  значений матрицы, содержащей результаты численного решения при некоторой величине начального условия, соответствующего номеру  $t$

$$z := y(1)^{\langle 1 \rangle}$$

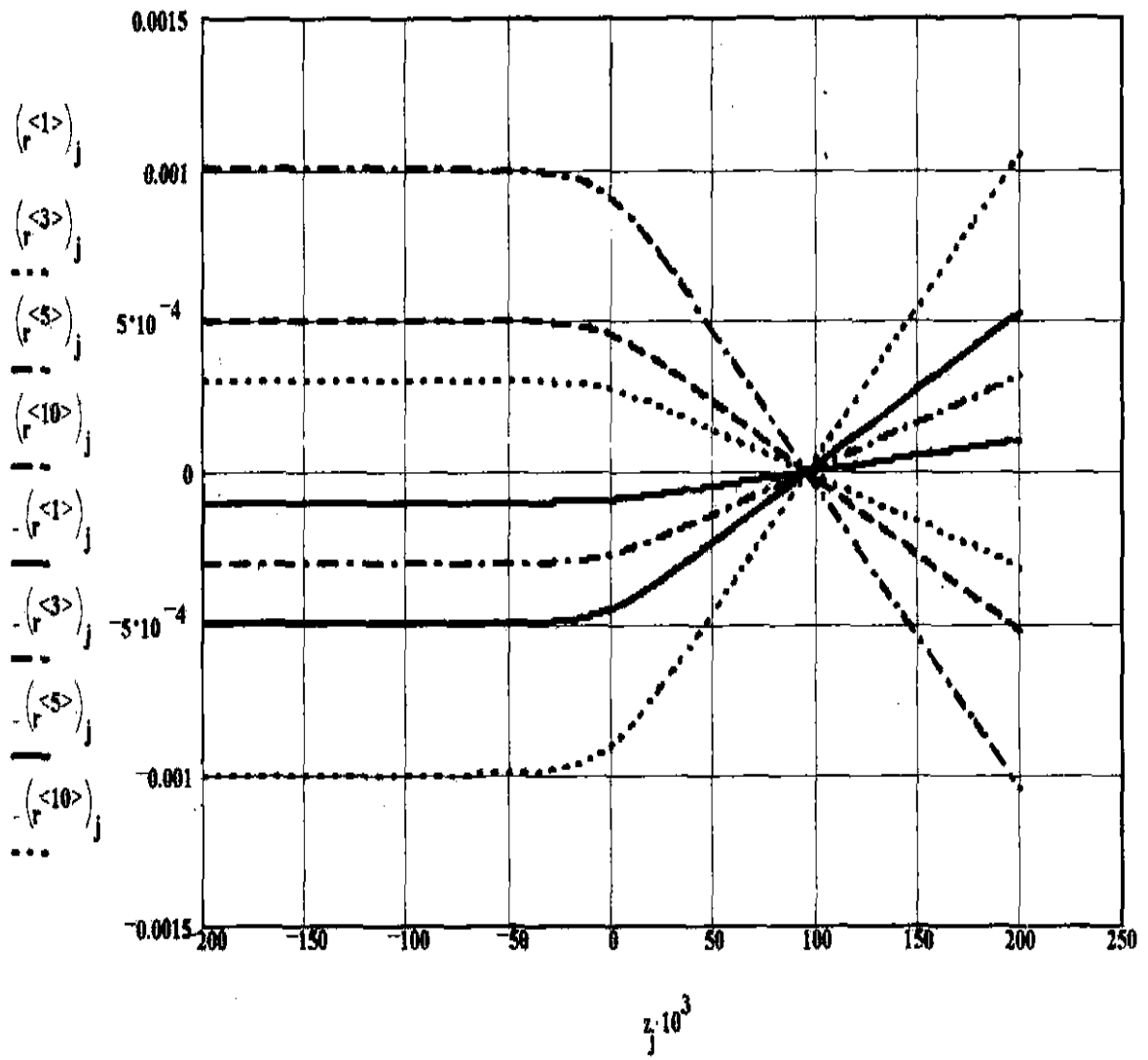
Присвоение переменной  $z$  значений аргумента, в которых ищется решение

$$r^{\langle 2 \rangle} := y(t)^{\langle 2 \rangle}$$

Присвоение переменной  $r$  значений найденного решения при начальном условии, соответствующем номеру  $t$

$$j := 1 \dots \text{rows}(z)$$

Задание текущего номера

График зависимости  $r(z)$  с различными начальными условиями

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Расчет и конструирование магнитной фокусирующей системы.

В данном проекте в качестве фокусирующей системы используется магнитная линза с экраном (рис.1)

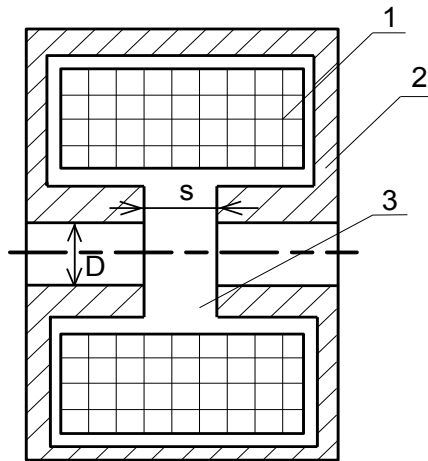


Рис. 1. Магнитная катушка с экраном.  
1–катушка; 2–магнитный экран; 3–немагнитный зазор

Магнитное поле концентрируется в области кольцевой щели и продольный размер линзы резко уменьшается. Сокращение продольного размера поля линзы сопровождается ростом индукции магнитного поля при тех же ампер-витках, создающих линзу. Очень сильные магнитные линзы с фокусными расстояниями порядка миллиметра можно создать путем введения полюсных наконечников. Такие линзы находят применение в электронных микроскопах.

- Определим нормировочный множитель  $L$ , который зависит от геометрических размеров зазора линзы из формулы (1).

$$L = \sqrt{s^2 + 0.45 \cdot D^2} \quad (1)$$

Берём отношение  $D/s=2$ . Отсюда  $D=40$  мм, а  $s=20$  мм.

$$L = \sqrt{20^2 + 0.45 \cdot 40^2} = 33,5 \text{ мм.}$$

- Определим полуширину поля (2):

$$d = 0,48 \cdot L = 16,08 \text{ мм.}$$

- Максимальное значение магнитной индукции в зазоре  $B_m$  определяется из соотношения (2):

$$B_m = \frac{\mu_o \cdot N \cdot I}{L} \quad (2)$$

где  $\mu_o$ —фундаментальная магнитная постоянная;  
 $N$ —число витков;  
 $I$ —ток катушки;  
 $I/N$ —намагничивающая сила катушки.

Возьмём  $I/N = 1000$  А/вит;  $\Rightarrow N=500$  вит;  $I=2$  А.

Т.к. плотность тока через провод  $j=2$  А/мм<sup>2</sup>, то площадь сечения равна  $S=1$ мм<sup>2</sup>.

$$B_m = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000}{33,5} = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

- Фокусное расстояние такой магнитной линзы можно рассчитать по формуле:

$$f_2 = \frac{98 \cdot U_o \cdot R_{cp}}{I^2 \cdot N^2} \quad (3)$$

где  $U_o$ —ускоряющее напряжение;  
 $R_{cp}$ —средний радиус катушки.

Возьмём число витков катушки по горизонтали 25 вит., а число витков по вертикали 20 вит. Отсюда длина катушки 30 мм, а высота 25мм.

$D=40$  мм (диаметр катушки);

$D_{т.1}=38$  мм (внешний диаметр трубки);

$c=3$  мм (толщина стенки трубки);

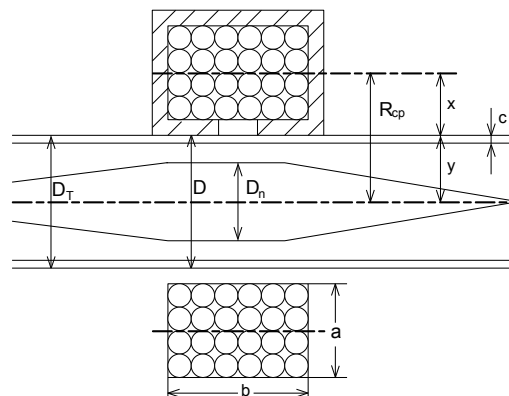


Рис. 2 Магнитная линза.

$D_n$ —диаметр пучка на входе в линзу, составляющий 0,5÷0,6 от диаметра внутреннего радиуса трубки  $D_{т.2}$ .

Внутренний диаметр трубки  $D_{Т.2}=D_{Т.1}-2\cdot c = 38-2\cdot 3=32$  мм.

$$D_n=0,6\cdot 32=19,2 \text{ мм.}$$

Средний радиус катушки  $R_{cp}$  равен:

$$R_{cp}=D/2+x=20+12,5=32,5 \text{ мм.}$$

Теперь можно определить фокусное расстояние  $f_2$  по формуле (3):

$$f_2 = \frac{98 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 32,5}{1000^2} = 95,55 \text{ мм.}$$



## Приложение 4

### Тепловой расчет и конструкция тигля

Данная система будет использована для плавки 1 кг золота, имеющего следующие физические параметры:

$$\rho = 19,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ - плотность золота;}$$

$$\lambda = 65,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ - удельная теплота плавления;}$$

$$c = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ - удельная теплоемкость;}$$

$$T = 1336 \text{ К} \text{ - температура плавления.}$$

Рассчитаем количества тепла, которое потребуется для расплавления золота:

$$Q_1 = c \cdot m \cdot \Delta T + m \cdot \lambda = 130 \cdot 1 \cdot 1038 + 1 \cdot 65,7 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Золото в процессе плавки находится в тигле. Тигель в свою очередь тоже нагревается до температуры плавления золота, на что требуется дополнительная мощность. Так же нужно учесть охлаждение за счет теплового излучения стенок тигля и поверхности расплавленного металла.

Приступим к выбору и расчету геометрии тигля. Тигель может быть выполнен из вольфрама, молибдена, вольфраммолибденового сплава. В нашем случае материалом тигля будет служить вольфрам, т.к. этот металл обладает наименьшим давлением паров при нагреве, и при температуре 1336 К оно настолько мало, что его можно не учитывать. Держатель так же выполнен из вольфрама.

Объем и размеры тигля рассчитаем с учетом объема расплавленного золота:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1}{19,3 \cdot 10^3} = 5,2 \cdot 10^{-5} = 52 \text{ см}^3.$$

Зная объем 1 кг расплавленного золота, будем считать, что в тигле он занимает объем  $(5 \times 5 \times 2,08) \text{ см}^3$  (рис. 1.а).

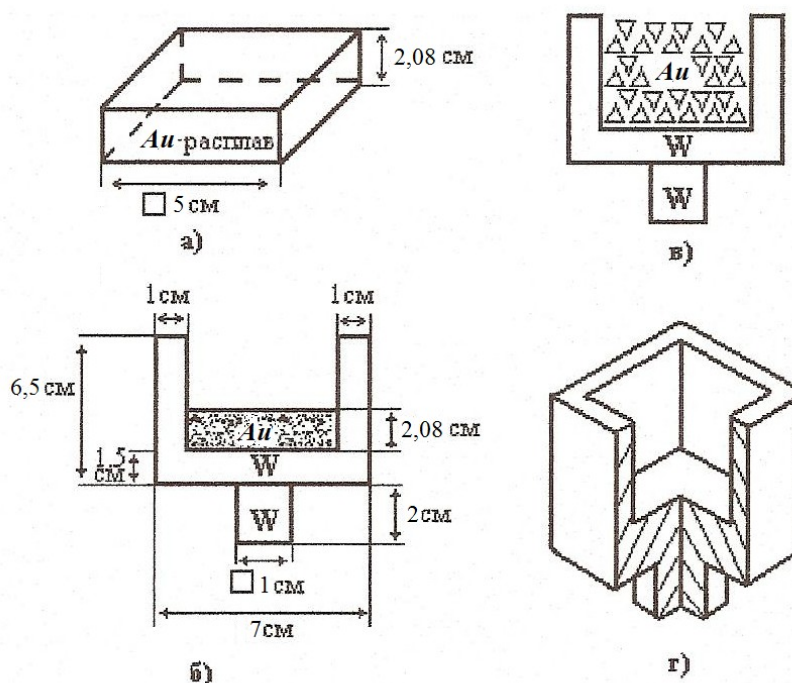


Рис. 1 Конструкция тигля:  
 а) Вид Au в расплавленном виде б) размеры тигля в) загрузка исходным материалом г) общий вид тигля.

Таким образом, толщину стенок тигля принимаем равной 1 см, дно - 1,5 см. Большую толщину брать не имеет смысла, потому что придется тратить на нагрев лишнюю мощность (рис. 1, б)

Воспользовавшись информационным ресурсом Internet [10], было выяснено, что в подобных установках в качестве исходного материала используется не цельный металл, а его стружка, дробленые куски и т.д. (рис. 1, в)

В связи с этим принято считать, что объем тигля должен быть примерно в три раза большим, чем объем расплавленного в итоге металла. Т.е. металл после расплавления будет занимать объем приблизительно равный 30-40% от общего объема тигля.

При учете этого условия размеры тигля выбраны так, как показано на рис. 1, б. Глубина тигля принята равной 5 см.

Теперь, зная размеры тигля, можно рассчитать площадь теплового излучения W и Au, ведущего к охлаждению конструкции, и потере мощности.

Площадь излучающей поверхности золота будет складываться только с открытой поверхностью. Поэтому:

$$S_{Au} = 5 \cdot 5 = 25 \text{ см}^2.$$

Площадь излучающей поверхности вольфрама будет складываться из следующих величин:

- 1)  $S_1 = 7 \cdot 6,5 \cdot 4 = 182 \text{ см}^2$  - площадь внешней поверхности;
- 2)  $S_2 = 1 \cdot 7 \cdot 2 + 1 \cdot 5 \cdot 2 = 24 \text{ см}^2$  - площадь ребер;
- 3)  $S_3 = 2,92 \cdot 5 \cdot 4 = 58,4 \text{ см}^2$  - площадь внутренней поверхности;
- 4)  $S_4 = 2 \cdot 2 \cdot 7 + 1 \cdot 2 \cdot 2 = 32 \text{ см}^2$  - площадь дна;
- 5)  $S_5 = 1 \cdot 2 \cdot 4 = 8 \text{ см}^2$  - площадь держателя.

Общая площадь  $S_W = 304,4 \text{ см}^2$ .

Найдем количество тепла, которое необходимо для нагрева вольфрама до температуры плавления золота:

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \Delta T.$$

Зная геометрию тигля, вычислим объем вольфрама, из которого тигель изготовлен. Объем будет складываться из следующих величин:

- 1)  $V_1 = 1,5 \cdot 7 \cdot 7 = 73,5 \text{ см}^3$  - объем донной части;
- 2)  $V_2 = 1 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 2 + 1 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 2 = 120 \text{ см}^3$  - объем стенок тигля.

Общий объем:  $V = V_1 + V_2 = 193,5 \text{ см}^3 = 1,935 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$

Плотность вольфрама  $\rho = 19,1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  удельная теплоемкость

$$c = 134 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} [7].$$

Таким образом:

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \Delta T = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T = 134 \cdot 1,935 \cdot 10^{-4} \cdot 19,1 \cdot 10^3 \cdot 1038 = 5,14 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

Далее зададим время технологического процесса  $t = 1 \text{ мин}$  и вычислим мощность теплового излучения с поверхностей металлов (W и Au), выделившуюся за это время:

- 1) Мощность, излучаемая с поверхности золота:

$$P_{Au} = \xi \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S_{Au},$$

где  $\xi$  - интегральный коэффициент излучения ( $\xi_{Au} = 0,219$ ) [8];

$$\sigma = 5,62 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2} - \text{постоянная Больцмана};$$

$T$  - температура плавления золота.

$S_{Au}$  - площадь излучающей поверхности.

$$P_{Au} = 0,219 \cdot 5,62 \cdot 10^{-12} \cdot 1336^4 \cdot 25 = 98 \text{ Вт} .$$

Количество теплоты с учетом времени технологического процесса:

$$Q_3 = P_{Au} \cdot t = 98 \cdot 1 \cdot 60 = 5,88 \cdot 10^3 \text{ Дж} .$$

2) Мощность, излучаемая с поверхности вольфрама:

$$P_W = \xi \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S_W , \text{ (при } \xi_W = 0,27 \text{) [8];}$$

$$P_W = 0,27 \cdot 5,62 \cdot 10^{-12} \cdot 1336^4 \cdot 304,4 = 1,47 \text{ кВт} .$$

Количество теплоты с учетом времени технологического процесса:

$$Q_4 = P_W \cdot t = 1,47 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 60 = 8,83 \cdot 10^4 \text{ Дж} .$$

3) Количество теплоты, передаваемое вольфраму:

$$Q_5 = \frac{\lambda \cdot S_{сеч} \cdot \Delta T \cdot t}{l} ,$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала

$$\lambda_W = 1,138 \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}} \text{ [8];}$$

$S_{сеч}$  - поперечное сечение проводника тепла;

$l$  - длина проводника тепла.

$$Q_5 = \frac{1,138 \cdot 7,5 \cdot 1038 \cdot 60}{1,5} = 3,54 \cdot 10^5 \text{ Дж} .$$

Теперь можно сложить все количество теплоты, которое требуется, чтобы расплавить 1 кг золота в вольфрамовом тигле за время равное 1 мин.

$$Q_{\text{ит}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 2 \cdot 10^5 + 5,14 \cdot 10^5 + 5,88 \cdot 10^3 + 8,95 \cdot 10^5 + 3,54 \cdot 10^5 = 1,16 \text{ МДж}$$

Далее вычислим мощность электронного потока по формуле:

$$P = I \cdot U = 0,75 \cdot 40 \cdot 10^3 = 30 \text{ кВт} ,$$

где  $I$  - ток луча;

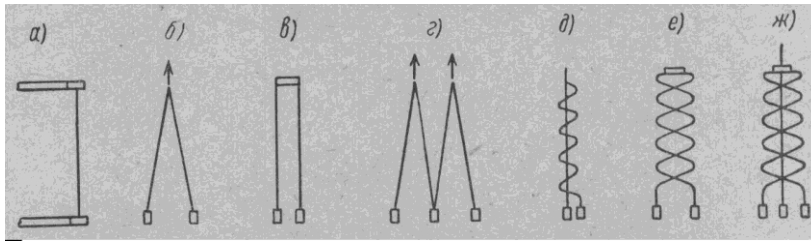
$U$  - ускоряющее напряжение.

Используя время технологического процесса, определим то количества тепла, которое отдает электронный поток:

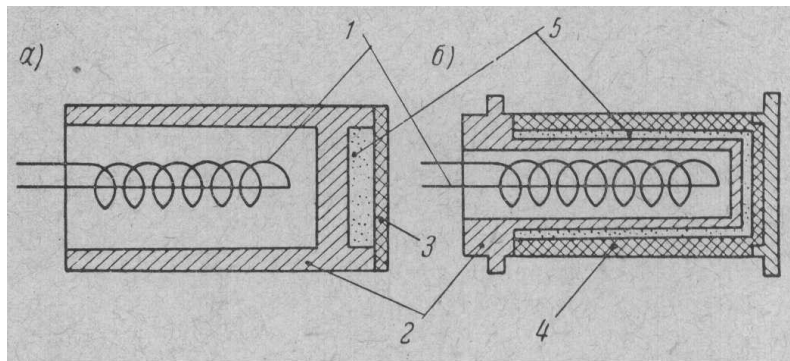
$$Q_{II} = P \cdot t = 30 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 60 = 1,8 \text{ МДж}.$$

Сравнив количество тепла, которое потребуется для плавления титана  $Q_{III}$  и количество тепла, которое отдает электронный поток  $Q_{II}$ , делаем вывод, что в данном случае количество тепла отдаваемого электронным лучом достаточно для того, чтобы расплавить кусок золота массой 1 килограмм в течение 1 минуты ( $1,8 \text{ МДж} > 1,16 \text{ МДж}$ ).

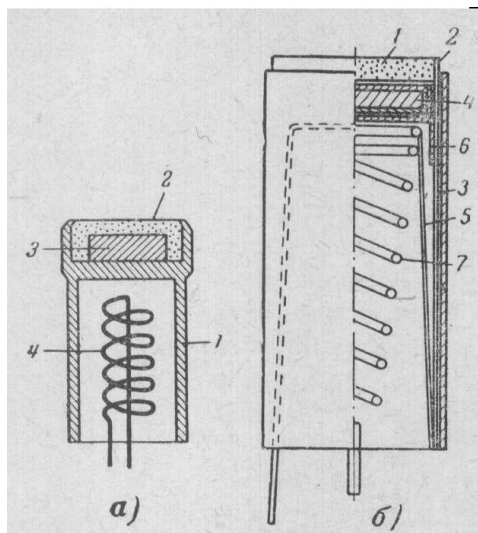
## Приложение 5



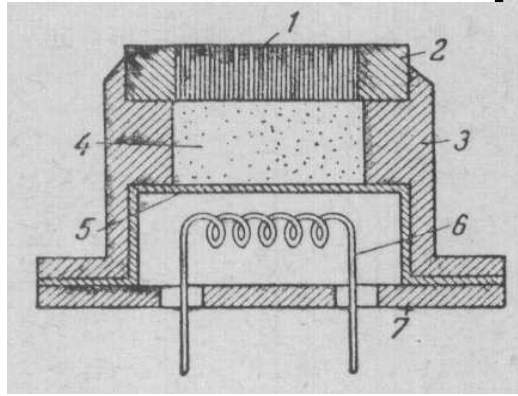
Конструкции вольфрамовых прямонакальных катодов.



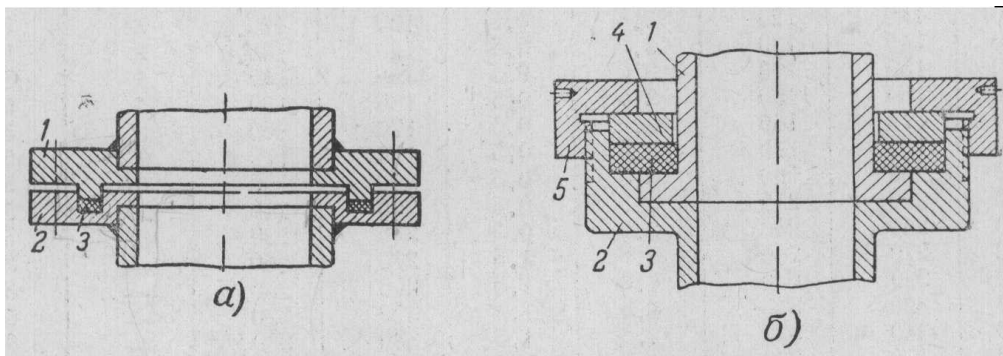
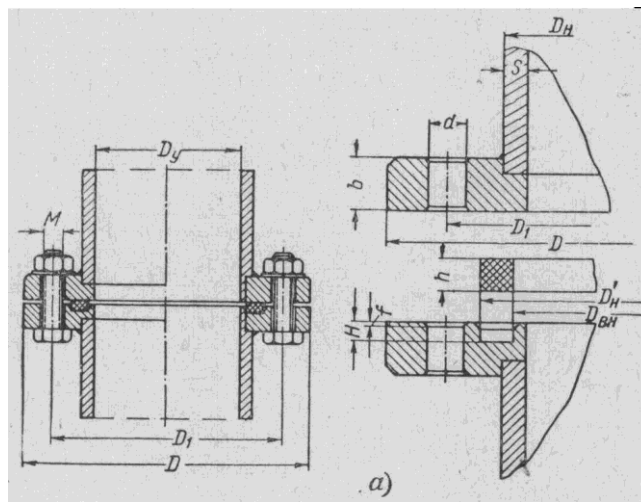
Конструкция L-катода.



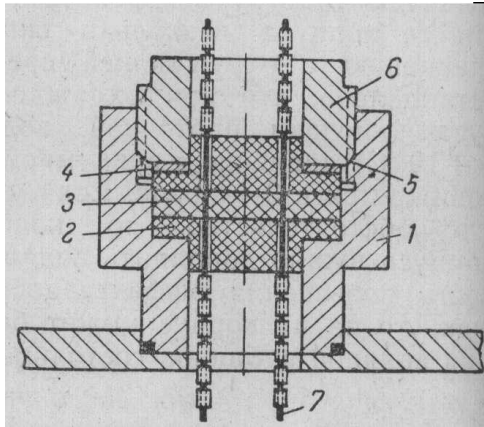
Варианты бариево-вольфрамового металлопористого катода.



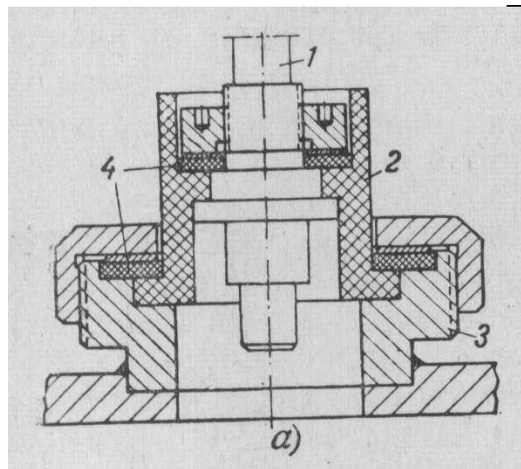
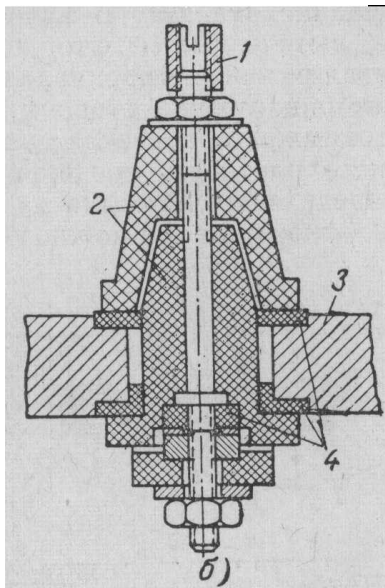
Пучковый бариево-вольфрамовый металлопористый катод.



Конструкции фланцевого соединения



Конструкции уплотнения нескольких электрических вводов.



Высоковольтный вакуумный ввод



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башенко В. В. Электронно-лучевые установки. - Л.: Машиностроение, 1972. -168 с.
2. Назаренко О. К. Электронно-лучевая сварка. - К.: Наумковская думка, 1965.
3. Вендик О. К., Горин Ю. Н, Попов В. Ф. Корпускулярно-фотонная технология. - М.: Высшая школа, 1984. - 240 с.
4. Попов В. Ф., Горин Ю. Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. - М.: Высшая школа, 1988. - 252 с.
5. Шерстнев Л. Г. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. - М.: Энергия, 1971. - 357 с.
6. Царев Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп. - М.: Энергия, 1967. – 367 с.
7. Жигарев А. А. Электронно-лучевые приборы. - М.: Энергия, 1965. – 335 с.
8. Молоковский С. И, Сушков А. Д. Электронно-оптические системы приборов СВЧ. - М.: Энергия, 1965. – 112 с.
9. Молоковский С. И, Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 302 с.
10. Бонштедт Б. Э, Маркович М. Г. Фокусировка и отклонение пучков. - М.: Советское радио, 1967.
11. Жигарев А. А, Шамаева Г. Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы. - М.: Высшая школа, 1982. - 462 с.
12. Алямовский И. В, Электронные пучки и электронные пушки. - М.: Советское радио, 1966. - 452 с.
13. Соболев В. Д. Физические основы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1979. - 448 с.
14. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. - М.: Наука, 1976. - 576 с.
15. Mathcad 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде WINDOWS 95. - М.: Информационно-издательский дом "Филинь", 1996. – 712 с.

Учебное пособие

Аксенов А.И., Злобина А.Ф., Н.Г. Панковец

Вакуумные и плазменные приборы и устройства  
Методические указания по курсовому проектированию

Усл. печ. л.                      Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40