

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

Научное направление:

«Высокие технологии в радиоэлектронных аппаратах»

**НАУЧНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА**

«Численная оптимизация аксиально–симметричных электронных пучков для аппаратов микрорентгеновской томографии»

под девизом: «Электронный пучок»

Сумы 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ В ЭЛЕКТРОННО–ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ .....	7
1.1. Общие принципы формирования пучков заряженных частиц .....	7
1.2. Электронные пушки со сходящимся аксиально-симметричным пучком .....	13
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ .....	17
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ПУШКИ .....	21
3.1. Исходные данные и постановка задачи .....	21
3.2. Модель трехэлектродной аксиально-симметричной пушки .....	23
3.3. Исследование параметров трехэлектродной аксиально-симметричной пушки .....	25
ВЫВОДЫ .....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	30

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГДИ	–	генератор дифракционного излучения
ЛБВ	–	лампа бегущей волны
ЛОВ	–	лампа обратной волны
МСМ	–	миллиметровые и субмиллиметровые волны
ЭВП	–	электронно-вакуумный прибор
ЭОС	–	электронно-оптическая система
ЭП	–	электронный пучок
РТ	–	рентгеновская томография
МРТ	–	микрорентгеновская томография
СВЧ	–	сверх высокие частоты
FIT	–	Finite Integration Technique
CST	–	Computer Simulation Technology

## ВВЕДЕНИЕ

Электронные пучки (ЭП), нашли широкое применение в промышленных технологических установках для обработки материалов: резки, сварки, плавления и распыления металлов, нанесения покрытий, исследовании и создании новых структур.

Одним из направлений применения ЭП является создание электронных сверхвысокочастотных (СВЧ) вакуумных приборов, которые используются в оборонных целях, промышленности и науке. ЭП также применяются как инструмент для анализа состава и структуры материалов (в том числе и неразрушающего). В настоящее время ЭП широко применяются при создании современного медицинского оборудования [1-5].

Интерес к ЭП в настоящей работе связан с возможностью их применения в медицинской аппаратуре. Это обусловлено тем, что современное развитие медицины требует создания новых приборов для диагностики и терапии с использованием потоков фотонов и заряженных частиц. Примером является рентгеновская томография (РТ). Несмотря на эффективность и распространенность данный метод обладает существенным недостатком – это негативное влияние ионизирующего излучения на органы человека, которые не подлежат исследованиям или терапии. Устранением недостатка этого метода есть создание узконаправленных источников рентгеновского излучения с целью локализации воздействия на конкретный исследуемый или облучаемый орган [6-10]. Эту задачу можно решить путем применения сфокусированных электронных пучков для создания точечных (квазиточечных) источников монохроматического рентгеновского излучения в комплексе с существующими системами фокусировки рентгеновского излучения. В последнее время это направление в медицине получило название микрорентгеновской томографии (МРТ) [6].

**Актуальность темы** заключается в необходимости создания электронных пушек для источников точечного монохроматического рентгеновского излучения направленного действия (фокусированных потоков рентгеновского излучения) в медицинских рентгеновских микротомографах.

**Целью работы является** численное моделирование параметров аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушки со сходящимся пучком для применения в рентгеновских трубках предназначенных для МРТ, также используемых в экспериментальных установках.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- выбор конструкции аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушки для создаваемой экспериментальной установки;
- моделирование распределения электростатических полей в аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушке;
- моделирование режимов работы аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушки;
- траекторный анализ движения электронного пучка в аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушке.

**Объектом исследований** являются физические процессы формирования аксиально-симметричных сходящихся ЭП в трехэлектродных электронно-оптических системах (ЭОС).

**Предметом исследований является** конструкция ЭОС, предназначенная для создания аксиально-симметричного сходящегося ЭП, а также структура формируемых электрических полей, траектория движения электронов и параметры формирования ЭП в данной ЭОС.

В процессе выполнения работы были использованы следующие теоретические **методы исследований:**

- метод геометрической оптики при выборе конструкции аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушки;

– метод интегральных уравнений (метод зарядовой плотности) при моделировании распределения электростатических полей, режимов работы и траекторного анализа движения электронного пучка в аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушке.

**Новизна полученных результатов.** В результате проведения работы было:

– выбрано новую конструкцию электродов ЭОС электронной пушки со сходящимся ЭП, предназначенной для создания источников монохроматического рентгеновского излучения направленного действия (сфокусированных потоков рентгеновского излучения) в медицинских рентгеновских микротомографах;

– проведено численное моделирование параметров формирования аксиально-симметричного ЭП в предлагаемой конструкции электронной пушки;

– проведен траекторный анализ движения ЭП в предлагаемой конструкции ЭОС аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушки.

**Практическое значение полученных результатов** заключается в том, что предлагаемая модель электронной пушки, результаты исследования ее параметров и режимов работы могут быть использованы для создания рентгеновских трубок применяемых в рентгеновской микротомографии.

**Апробация.** Материалы, используемые в работе докладывались и обсуждались на:

– 6-й Международной молодежной научно-технической конференции “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ–2010” (Севастополь, 2010г.);

– научно-технической конференции сотрудников, преподавателей и студентов СумГУ (Сумы, 2011г.).

Тезисы докладов опубликованы в сборниках научных трудов вышеперечисленных конференций [10,11].

# 1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ В ЭЛЕКТРОННО–ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## 1.1. Общие принципы формирования пучков заряженных частиц

Электронные пучки – это одна из разновидностей пучков заряженных частиц. Практически все электронно-вакуумные приборы (ЭВП) построены на основе ЭП. Электронные пучки используются в различных приборах в промышленности, науке, и медицине. В зависимости от поставленных целей и задач применяются различные типы электронных пучков [12-14].

Существуют различные конфигурации ЭП (рис. 1.1). Конфигурация ЭП, как правило, определяется ЭОС. В зависимости от формы поперечного сечения, пучки можно разделить на аксиально-симметричные и плоские. Могут существовать и другие формы поперечного сечения пучков, однако они применяются крайне редко, и поэтому в настоящей работе рассматриваться не будут.

Аксиально-симметричные пучки имеют поперечное сечение близкое к окружности. Поток частиц симметричен относительно оси распространения пучка. Такие пучки могут быть параллельными (цилиндрическими) (рис. 1.1а), коническими (сходящимися) (рис. 1.1б). Одной из разновидностей аксиально–симметричных пучков являются трубчатые пучки. Трубчатый пучок обладает осевой симметрией, поперечное сечение имеет вид кольца. Такие пучки могут быть цилиндрическими и коническими (рис. 1.1в, г).

Ленточные (плоские пучки), сечение которых представляет собой прямоугольник. В таких пучках толщина значительно меньше ширины.

Такие пучки также могут быть параллельными или клиновидными (сходящимися или расходящимися) (рис. 1.1д,е) [15-17].

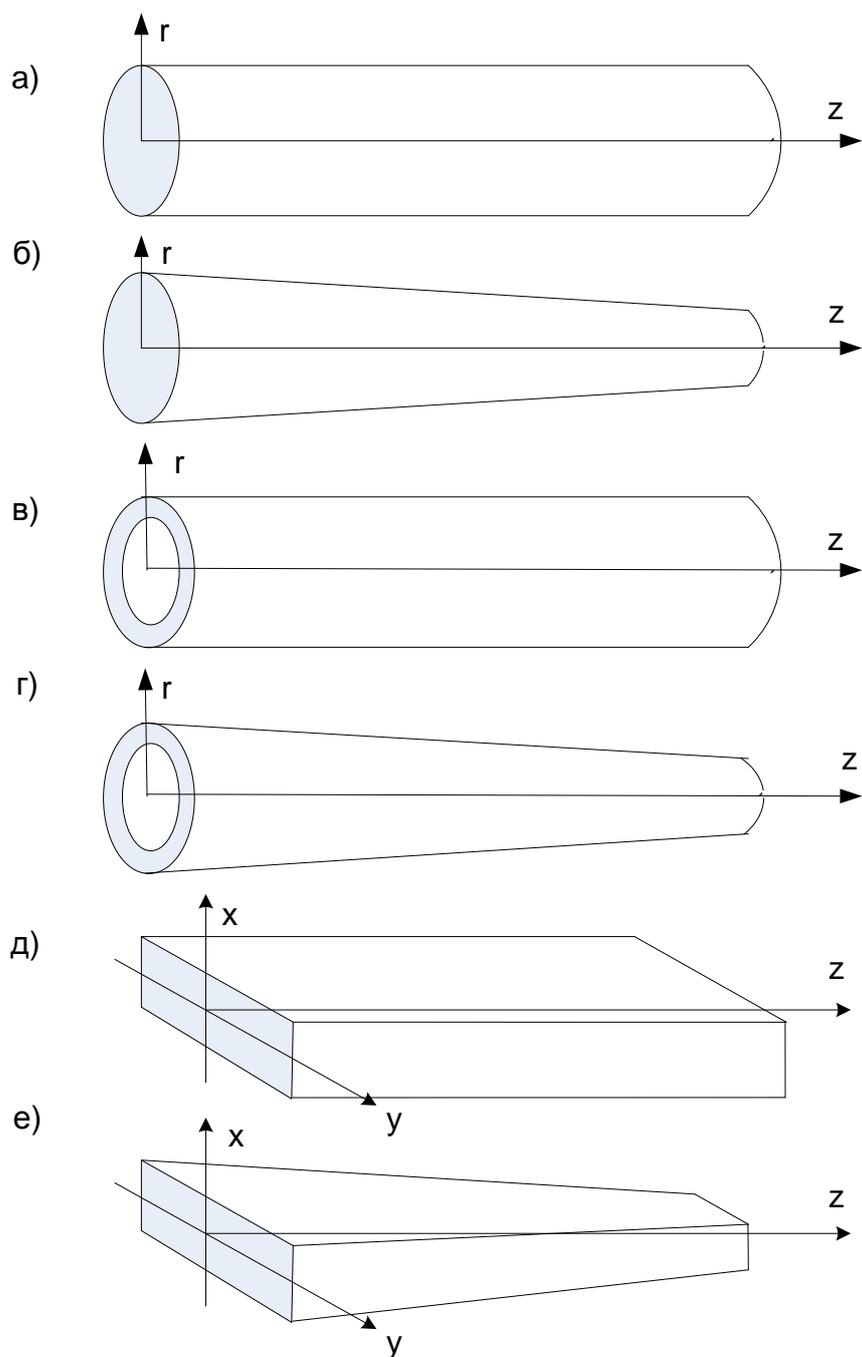


Рис. 1.1. Конфигурации ЭП: а) аксиально-симметричный параллельный; б) аксиально-симметричный сходящийся; в) трубчатый параллельный; г) трубчатый сходящийся; д) ленточный параллельный; е) ленточный клиновидный сходящийся

В процессе создания ЭОС, важными являются задачи формирования ЭП. При этом предъявляются следующие требования:

1. Высокий первеанс. То есть получение пучков с большим током при малых ускоряющих потенциалах.

2. Форма пучка должна обеспечивать возможность его прохождения через ЭОС без потерь. Другими словами необходимо обеспечить согласование эмиттанса пучка с акцептансом ЭОС.

Следует отметить, что в случае создания ЭОС с неинтенсивными ЭП (низком первеансе) принято учитывать:

- параксиальность траекторий электронов в ЭП;
- ламинарность ЭП;
- равномерность распределения плотности объемного заряда в ЭП;
- наличие начальных тепловых скоростей электронов на катоде;
- отсутствие релятивистских эффектов;

Учет этих параметров при моделировании дает результаты весьма близкие к экспериментальным данным [15].

Рассмотрим на простейший пример конфигурации электродов устройства для формирования аксиально-симметричного электронного пучка – электронной пушки (рис. 1.2).

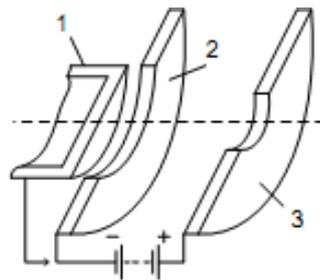


Рис. 1.2. Схема конфигурации электродов аксиально-симметричной электронной пушки: 1 – катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – анод

В данном примере электронная пушка состоит из катода, фокусирующего электрода и анода. Для того, чтобы фокусирующий (управляющий) электрод служил для регулировки, управления током и углом сходимости пучка

необходимо на фокусирующий электрод подать небольшой отрицательный (относительно катода) потенциал [16,18,19].

В зависимости от назначения ЭП должен иметь определенные характеристики, которые задаются источником электронов и конструкцией пушки. Основными из них являются: величина и плотность тока пучка, компрессия, первеанс, эмиттанс, яркость и интенсивность пучка. Например, в мощных клистронах величина тока ЭП составляет несколько десятков ампер, а плотность тока доходит до сотен ампер на квадратный сантиметр. В случае электронной микроскопии, для получения высокой четкости изображения и большей разрешающей способности при создании электронно-оптических изображений, требуется резко очерченное поперечное сечение пучка в фокусе на плоскости, перпендикулярной к оси пучка. Это обуславливает необходимость наименьшего разброса скоростей электронов и углов, относительно оптической оси системы. В этом случае применяются пучки с током порядка десятков микроампер, а плотность тока не превышает нескольких ампер на квадратный миллиметр.

Принято различать слабые (неинтенсивные) и интенсивные электронные пучки. Интенсивными называются ЭП, при расчете которых, нельзя пренебречь силами кулоновского расталкивания.

Как правило, величина и плотность тока пучка характеризуется эмиссионной способностью катода, т.е. отношением максимального эмиссионного тока катода к его площади при заданной температуре работы. При формировании ЭП важно учитывать распределения плотности тока в сечениях ЭП. Это позволяет проследить изменение внутренней структуры ЭП при взаимодействии его с внешними полями (изменение геометрической формы и размеров пучка, резкость границы). Эта информация является ключевой при исследовании систем формирования пучков частиц и поиска оптимальных режимов их работы.

В случае формирования интенсивных ЭП, важным параметром является отношение диаметра эмитирующей поверхности катода к диаметру (площади

поперечного сечения) электронного пучка в кроссовере. Это отношение называется компрессией пучка. Величина компрессии зависит, в основном, от угла сходимости пучка.

Для уменьшения токовой нагрузки на катод, обычно выбирают большую величину компрессии, следовательно, и большую величину угла сходимости. Но увеличение компрессии вызывает в дальнейшем трудности при согласовании электронной пушки с фокусирующей системой.

При создании интенсивных ЭП используют большие токи, что приводит к увеличению пространственного заряда ЭП, который в свою очередь заметно влияет на траектории электронов. Величина пространственного заряда характеризуется первеансом пучка:

$$P = \frac{I}{U^{3/2}} \left[ \frac{A}{B^{3/2}} \right]. \quad (1.1)$$

Величина первеанса не зависит от абсолютных значений геометрических размеров электродов пушки, а зависит от тока пучка и потенциалов на электродах. Следовательно, первеанс является наиболее удобным параметром для сравнения характеристик различных типов пушек. Например, в установках электронной сварки, значение первеанса составляет  $0,01 \div 2,0$  мкА/В<sup>3/2</sup>, в приборах СВЧ первеанс может достигать десятков мкА/В<sup>3/2</sup>, а в электронно-лучевых приборах он составляет лишь  $10^{-4} \div 10^{-5}$  мкА/В<sup>3/2</sup>. При больших значениях первеанса пучок становится неустойчивым, токопрохождение нарушается. От величины первеанса зависит пространственное распределение потенциалов и скоростей электронов в пучке.

Для описания пучка, степени упорядоченности его структуры и распределения поперечных скоростей принято использовать такие понятия, как фазовая характеристика пучка (фазовый объем), фазовый эллипс и эмиттанс пучка. Фазовая характеристика пучка представляет собой множество точек в фазовом пространстве  $r$  и  $r'$ , где  $r$  – радиальная координата пучка,

$r' = dr/dz$  – наклон траектории каждой частицы, из совокупности образующих ЭП и движущихся вдоль оси  $z$ .

Проекция фазового объема пучка на фазовую плоскость имеет форму эллипса (фазовый эллипс). Площадь фазового эллипса, деленная на  $\pi$ , называется эмиттансом пучка. Для количественного описания качества неламинарных ЭП используется понятие среднеквадратичного эмиттанса, который в электронно-оптических системах с термокатодом рассчитывается по упрощенной формуле [20]:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{2} r_k \sqrt{\frac{eU}{kT_k}}, \quad (1.2)$$

где  $r_k$  – радиус катода,  $e$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_k$  – температура катода.

Еще одной характеристикой ЭП является яркость. Яркость – это плотность тока в единице телесного угла, в котором распространяется пучок:

$$B = \frac{dI}{dS \cdot d\Omega} \quad (1.3)$$

где  $dI$  – ток выделенного в ЭП элементарного участка,  $dS$  – площадь его поперечного сечения,  $d\Omega$  – телесный угол распространения пучка.

В большинстве случаев яркость изменяется по сечению пучка и ее расчет затруднен, поэтому часто используются приближенные выражения, базирующиеся на определении яркости через плотность тока на оси ЭП.

Наибольшие требования к яркости ЭП предъявляют при микроанализе в электронной микроскопии, и лазерах на свободных электронах, где используются очень тонкие пучки [21]. Наибольшие яркости ЭП получают, используя вольфрамовые автоэмиссионные источники [22].

Еще одним из основных параметров пучка есть интенсивность. Интенсивность пучка – это число испускаемых электронов за единицу времени, отнесенное к единице площади излучающей поверхности, т.е. плотность эмитируемого тока.

## **1.2. Электронные пушки со сходящимся аксиально-симметричным пучком**

Для решения задачи формирования ЭП используют два основных метода: метод анализа и метод синтеза. Первый метод состоит в последовательном изменении геометрии электродов пушки до тех пор, пока параметры формируемого ЭП не будут удовлетворять заданным. В данном случае определяется исходная конфигурация геометрии электронной пушки, проводится траекторный анализ, по результатам которого определяются параметры ЭП, внесение изменений в исходную геометрию и последующий траекторный анализ нового варианта и т.д. Этот метод достаточно трудоемкий.

Второй метод осуществляется без применения процесса подбора. Расчет базируется на использовании известных соотношений, описывающих движение пучков в декартовой, цилиндрической или сферической системах координат.

Основной вклад в развитие метода анализа формирования пучков заряженных частиц был внесен Дж.Р.Пирсом, первоначально разработавшим пушки для формирования прямолинейных ламинарных электронных пучков простой конфигурации: ленточных, цилиндрических и конических [23]. Пушки Пирса получили широкое распространение, так как формируют пучки с высоким первенсом и поддаются достаточно точному и простому расчету. Недостатком пушек Пирса является сложный профиль электродов. Но несмотря на это, ЭОС на базе пушек Пирса получили широкое распространение с применением различных типов катодов: термоэмиссионного, фотоэмиссионного и автоэмиссионного [24-27].

Одной из разновидностей пушек Пирса является конструкция пушки, разработанная Тренивой С.Н.. Это пушка сферического типа, состоящая из катода, фокусирующего электрода и анода (рис. 1.3).

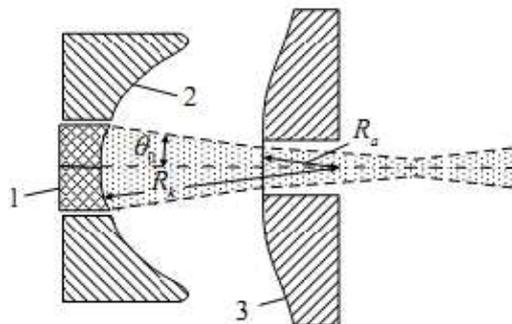


Рис. 1.3. Сферическая пушка Тренивой: 1 – катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – анод

Пушка Тренивой предназначена для формирования клиновидных и конусообразных сходящихся пучков электронов с различными углами схождения  $\theta_0$  [17].

Расчет пушки Пирса для создания сходящегося аксиально-симметричного ЭП базируется на использовании радиального потока в сферической системе координат. Первоначально рассматривается сферический диод, образованный из двух сфер с общим центром. Наружная сфера является катодом ( $R_K$ ), а внутренняя – анодом ( $R_A$ ) (рис. 1.4).

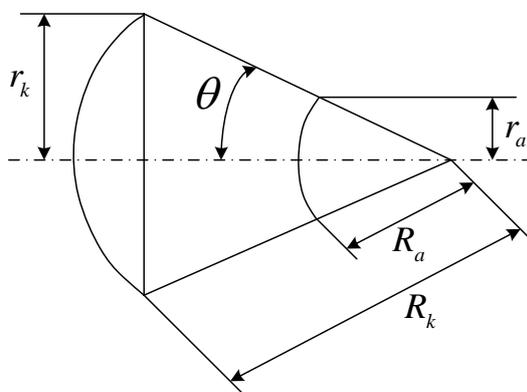


Рис. 1.4. Модель сферического диода с наружным катодом и внутренним анодом

Электронный ток, частицы в котором движутся по прямым линиям (по радиусам), характеризуется соотношением:

$$I_{\tilde{n}\hat{o}} = \frac{16\pi\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U_a^{3/2}}{(-\alpha)^2}, \quad (1.4)$$

где  $(-\alpha)^2$  — функция Ленгмюра, зависящая от отношения радиусов кривизны катодной ( $R_k$ ) и анодной ( $R_a$ ) поверхностей.

Плотность тока с катода будет равна:

$$j_k = \frac{I_{c\hat{o}}}{4\pi R_k^2} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U_a^{3/2}}{(-\alpha)^2 R_k^2}. \quad (1.5)$$

Распределение потенциала между катодом и анодом определяется формулой:

$$U(R) = U_a \left( \frac{-\alpha}{-\alpha_a} \right)^{4/3}, \quad (1.6)$$

где  $R$  — радиус, проведенный из центра сферы в рассматриваемую точку.

Следует отметить, что вблизи анода потенциал нарастает более резко, чем в плоском диоде с тем же расстоянием катод — анод [15,16]. В пушках такой конфигурации существует рассеивающее действие в области анодного отверстия (линзы). Вследствие преломляющего действия анодной линзы угол

схождения электронных траекторий на выходе из пушки будет меньшим, чем начальный угол схождения (рис. 1.5) [16,28].

В работе [28] был рассмотрен электронный пучок, имеющий вид конуса с углом при вершине  $2\theta$ . Для того чтобы вдоль границы конусообразного пучка сохранилось то же распределение потенциала (1.6), какое было в исходном замкнутом сферическом диоде, снаружи потока необходимо расположить фокусирующий электрод и анод соответствующей формы. Форму фокусирующего электрода можно определить расчетным путем или моделированием на электролитической ванне [15].

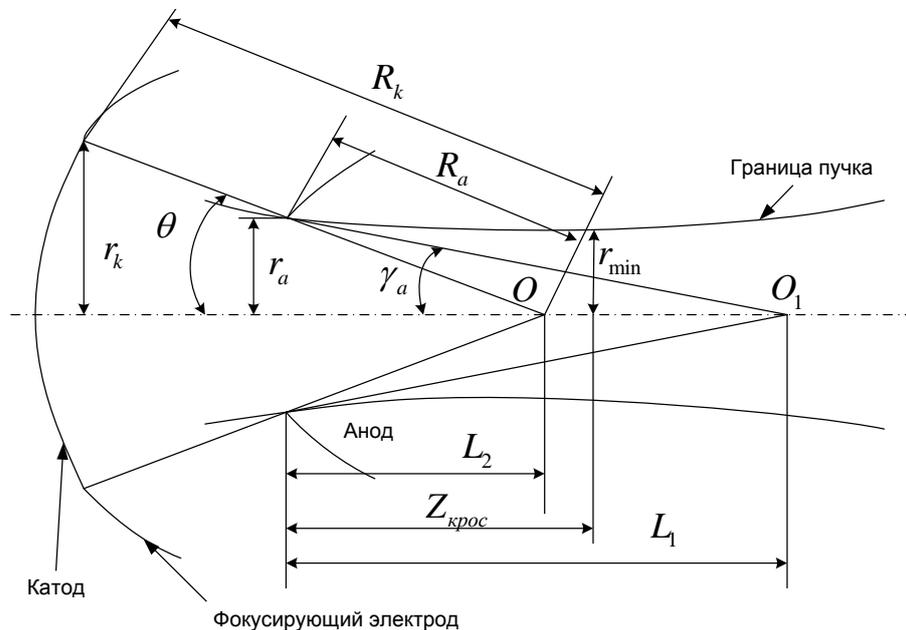


Рис. 1.5. Схематическое изображение сходящегося потока, сформированного пушкой сферического типа:  $r_k$  – радиус катода,  $R_k$  – радиус кривизны катодной поверхности,  $\theta$  – половина угла сходимости потока в пушке,  $\gamma_a$  – половина угла сходимости потока за анодом,  $r_a$  – радиус потока в плоскости анода

Расчеты приведенные в работе [28] показывают, что поверхность с нулевым потенциалом имеет форму чаши или колокола, она подходит к границе потока под углом примерно равным  $70^\circ$  [16]. На практике обычно выполняют электроды более простой формы, в той или иной степени аппроксимирующей контуры требуемых поверхностей [15,16,28].

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Теоретические методы исследования ЭП основаны на анализе структуры электростатических полей, траекторий движения электронов, их энергий, пространственных координат и других параметров. Моделирование траекторий в реальных полях значительно усложняется по сравнению с исследованием траекторий частиц в однородных полях. Теоретические методы исследования ЭП разделяют на аналитические и численные [29].

Что касается *аналитических методов*, то они приемлемы только для элементарно простых ЭОС. В этом случае удастся получить точное выражение для описания потенциалов или напряженностей полей. В реальных ситуациях при рассмотрении произвольного скалярного электростатического или магнитного потенциала, как функции пространственных координат, зачастую удобно представлять его в виде ряда Фурье [30]. Однако не всегда существует возможность выразить распределения полей в реально используемых системах. Поэтому, в большинстве случаев оптимальным является использование численных методов для исследования ЭП.

К наиболее распространенным *численным методам* расчета электростатических полей и траекторий движения электронов относят: метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод зарядовой плотности (интегральный метод). Характерной особенностью численных методов решения дифференциальных уравнений является высокий порядок аппроксимирующих формул, что позволяет увеличить шаг интегрирования, сокращает затраты машинного времени, а также уменьшает полную погрешность вычислений [31,32].

Определение потенциала **методом конечных разностей** основывается на дискретизации уравнения Лапласа. Непрерывное дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений, решение которой приводит к получению потенциала. Первоначально вся исследуемая область

покрывается дискретной сеткой (расчетной решеткой). Способ дискретизации системы однозначно не определен, поскольку можно свободно выбирать сетку по типу решаемой задачи, следовательно, конечная ширина ячейки может быть переменной. Точность вычислений зависит от выбора формы и размера ячейки. Определив параметры сетки и записав уравнения для всех узлов, можно переходить на этап численного решения системы линейных алгебраических уравнений прямыми или итерационными методами [28,33]. Метод конечных разностей используется в современных программных пакетах QuickWave-3D, Fidelity, XFDTD, CST Microwave Studio и др.

**Метод конечных элементов** основывается на замене уравнения Лапласа набором линейных алгебраических уравнений, связывающих друг с другом значения потенциала в узлах расчетной сетки. Данный метод отличается от предыдущего тем, что используется расчетная сетка из треугольных элементов переменных размеров, покрывающих всю область, для которой необходимо найти решение уравнения в частных производных. Аппроксимируемая вариация потенциала  $\Delta U$  на каждом таком элементе связывается с положением угловых узлов, и строится функционал (интегральная величина, определенная на множестве функций), минимизация которого по значениям потенциала в узлах треугольников эквивалентна решению уравнения в частных производных [33,34]. Таким образом, метод конечных элементов базируется на основе вариационного подхода.

Возможность произвольно менять форму и плотность элементов является преимуществом метода конечных элементов перед методом конечных разностей. Данная особенность обуславливает простоту постановки граничных условий и рассмотрения сложных электродных или полюсных конфигураций. Очевидным недостатком метода конечных элементов является его относительно низкая точность (особенно в критической области, прилегающей к оси), обусловленная предположением о линейной зависимости потенциала от узловых значений.

В зависимости от поставленной задачи используют тот или иной метод. Например, для нелинейных магнитных задач больше подходит метод конечных элементов, а при вычислении электростатических полей следует использовать метод конечных разностей. Недостатком метода является то, что его эффективное применение возможно только для закрытых систем. В случае отсутствия экранирования фокусирующего или отклоняющего элемента в вычислениях появляются большие ошибки. На методе конечных элементов основаны такие пакеты электромагнитного моделирования: HFSS, Multiphysics, ANSYS, Dynamic Finite Element Program Suite и FEMLAB.

**Метод зарядовой плотности** (интегральный метод) или Finite Integration Technique (FIT) основывается на том, что статическое поле выводится из области, занятой проводником. По поверхностям всех проводников заряды распределяются таким образом, что поверхности становятся эквипотенциальными. Эти заряды являются источниками электростатического распределения потенциала в пространстве, окружающем электроды, в том числе и потенциалов самих электродов. Заменяя потенциалы электродов этими поверхностными распределениями, можно рассчитать потенциал в любой точке на основе принципа суперпозиции полей. Этот метод является более эффективным по сравнению с методами конечных разностей или конечных элементов, где необходимо использовать сложные расчетные сетки. Преимуществом данного метода также является возможность точного вычисления распределения потенциала на оси без условия наличия замкнутых границ [35-37].

Впервые метод FIT применил Вейлэнд в 1977 году [38]. Данный алгоритм нашел применение в акустике, динамической теории упругости, при моделировании электромагнитных полей, пьезоэлектрических эффектов и др. FIT основан на использовании системы уравнений Максвелла в интегральной форме. Дискретизация уравнений осуществляется по двухсеточной схеме (две расчетные сетки расположены ортогонально друг другу). Механизм дискретизации уравнений Максвелла заключается в последовательной замене

аналитических операторов ротора и дивергенции их дискретными аналогами, что позволяет сформировать систему так называемых сеточных уравнений Максвелла [39]. Данный метод не накладывает никаких ограничений на тип используемой сетки дискретизации пространства, что позволяет проводить моделирование трехмерных конфигураций систем любой сложности. Численный алгоритм FIT был успешно реализован в программных пакетах CST MAFIA и CST Studio Suite.

Помимо теоретических методов определения параметров пучков существуют и экспериментальные, которые в свою очередь можно разделить на прямые и косвенные.

Первая группа методов основана на измерении характеристик непосредственно самих электронных пучков: тока, плотности тока, энергии, распределения по скоростям и т. д.

Вторая группа методов основана на регистрации и анализе электрических и магнитных полей ЭП, или различных эффектов, происходящих при взаимодействии электронов со средой или объектами, размещенными на пути движения ЭП [11,37].

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ПУШКИ

#### 3.1. Исходные данные и постановка задачи

Для достижения поставленной цели в данной работе необходимо методом численного анализа определить конфигурацию ЭОС аксиально-симметричной пушки и оптимальные режимы ее работы.

Численное моделирование параметров работы аксиально-симметричной пушки проводилось с помощью программного обеспечения CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite, которая включает в себя инструменты для проектирования и оптимизации различных устройств. CST Particle Studio является одним из модулей программного комплекса, позволяющий реализовать быстрый и точный анализ динамики заряженных частиц в 3D электромагнитных полях. Алгоритм работы программы построен на использовании *интегрального метода* определения динамики движения заряженных частиц. Особенностью технологии CST является использование различных типов сеток: шестигранные, тетраэдрические и другие. С помощью данной программы при моделировании можно учитывать специфику потоков заряженных частиц, типы источников, граничные условия и т.д.

В качестве основного элемента ЭОС была выбрана катодная пушка со следующими параметрами:

- состав катода: вольфрам;
- эмиссионная поверхность пушки плоская;
- диаметр эмиссионной поверхности пушки – 1мм;
- величина тока эмиссии –  $0 \div 20$ мА.

Исходные требования к ЭОС:

- конструкция пушки – трехэлектродная (катод, фокусирующий электрод, анод);
- кроссовер пучка должен находиться в области анода пушки;
- ток пучка в кроссовере, мА 1
- максимальное ускоряющий потенциал, кВ 30
- диаметр пучка в кроссовере, мм  $0,1 \div 0,25$
- расстояние между катод и анодом, мм 6
- диаметр анода, мм 6
- диаметр пролетного отверстия анода, мм 0,3

Прототипом для исследования данной конструкции электронной пушки была взята пушка Пирса. Изначально для определения геометрии фокусирующего электрода электронной пушки была рассмотрена диодная модель. При траекторном анализе электроны помещались в область электрического поля катода с некоторой начальной кинетической энергией (15 эВ). Начальный угловой разброс скоростей по направлениям относительно оси ЭП был выбран величиной  $\pm 10^\circ$ . Моделирование проводилось при ускоряющем потенциале 20 кэВ и токе пучка 1 мА. В результате была получена следующая геометрическая модель (рис. 3.1) и распределение поля (рис. 3.2) для заданных параметров.

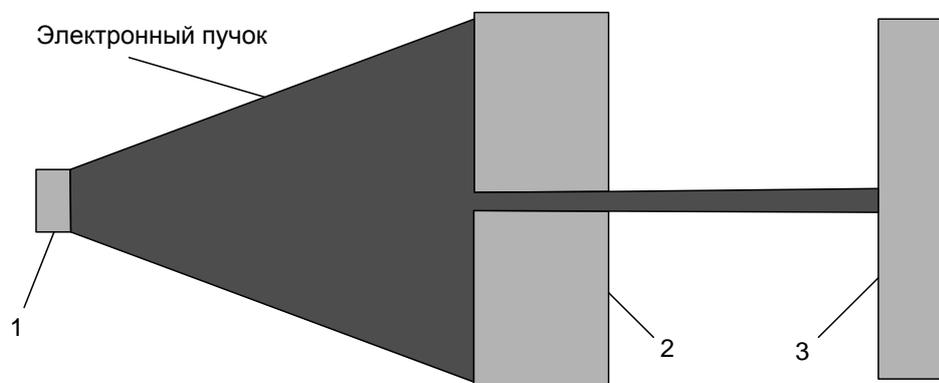


Рис. 3.1. Диодная модель: 1 – катод, 2 – анод, 3 – мишень

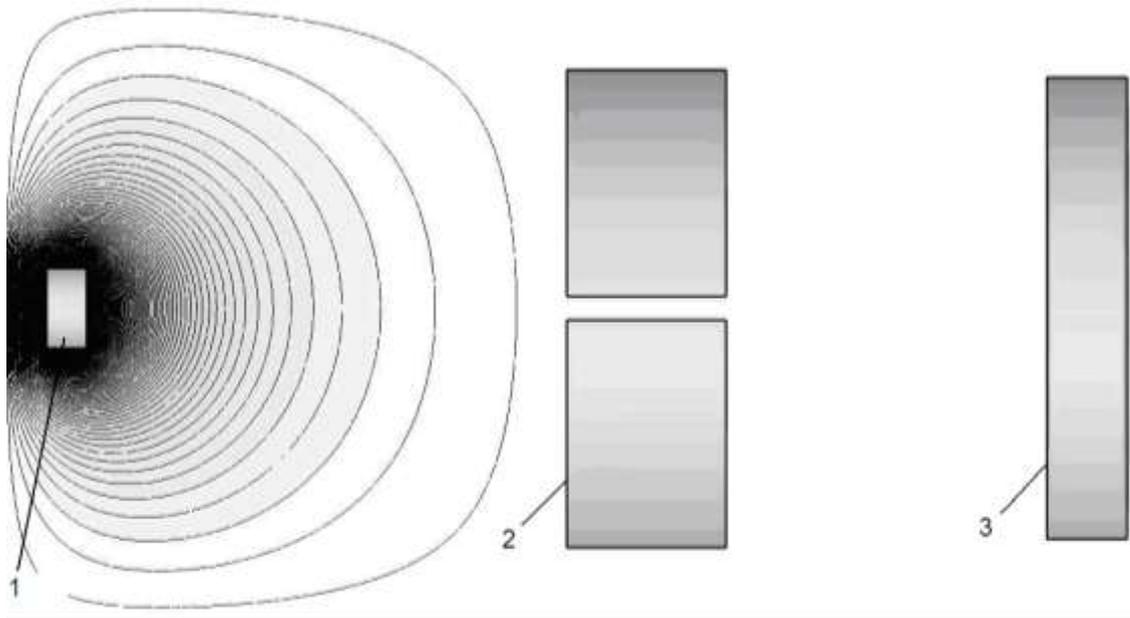


Рис. 3.2. Распределение поля (эквипотенциальных поверхностей) в диодной системе: 1 – катод, 2 – анод, 3 – мишень

На следующем этапе проектирования ЭОС пушки была определена конфигурация и геометрические размеры фокусирующего электрода. При определении конфигурации фокусирующего электрода был использован метод геометрической оптики.

### 3.2. Модель трехэлектродной аксиально-симметричной пушки

На основании расчетов геометрических размеров фокусирующего электрода ЭОС пушки была разработана модель трехэлектродной аксиально-симметричной пушки для создания сфокусированного электронного пучка. На рис. 3.3 представлена проекция конфигурации электродов исследуемой ЭОС на плоскость, совпадающую с осью пучка. В таблице 3.1 приведены основные геометрические размеры электродов, определяющих структуру формируемых электрических полей (рис. 3.4).

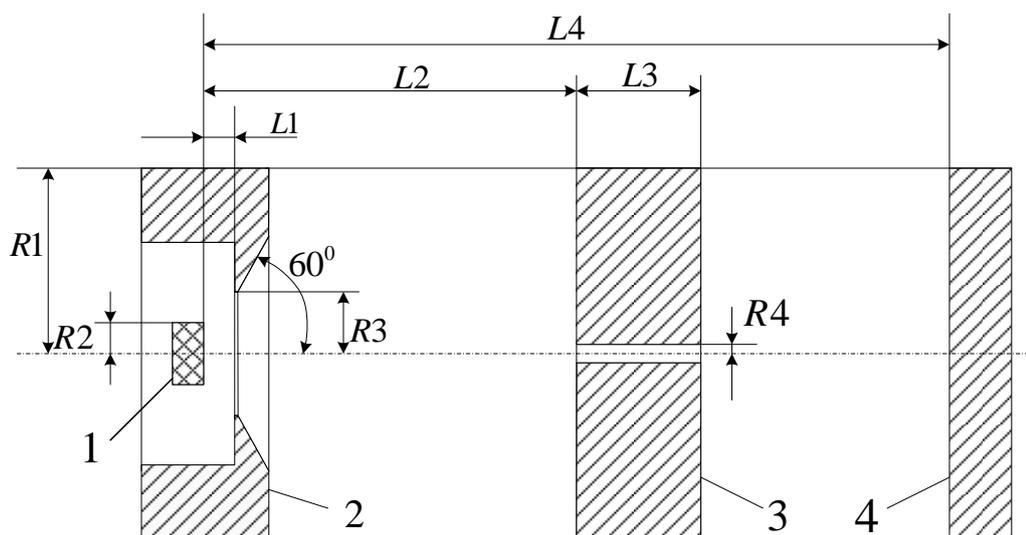


Рис. 3.3. Конструкция электродов моделируемой аксиально-симметричной электронной пушки. 1 – катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – анод, 4 – мишень

Таблица 3.1

**Основные геометрические размеры моделируемой ЭОС**

Параметр	R1	R2	R3	R4	L1	L2	L3	L4
мм	1,5	0,5	1	0,15	0,5	6	2	4

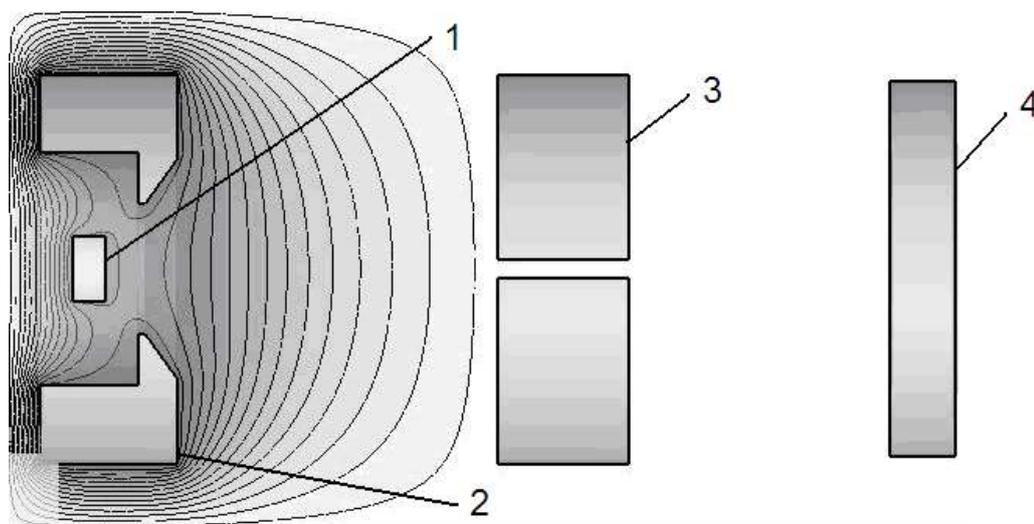


Рис. 3.4. Структура электрических полей, формируемых ЭОС при ускоряющем потенциале 20 кВ: 1 – катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – анод, 4 – мишень

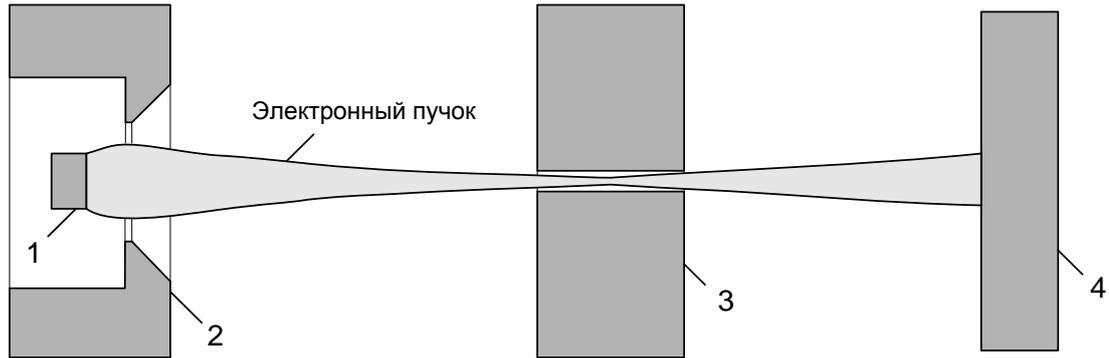


Рис. 3.5. Траектория движения электронного потока в ЭОС трехэлектродной пушки при ускоряющем потенциале 20кВ и токе пучка 1мА

### 3.3. Исследование параметров трехэлектродной аксиально-симметричной пушки

Поскольку структура формируемых электрических полей определяется величинами заданных на электродах потенциалов, то одной из задач работы было определение оптимальных величин фокусирующего потенциала при ускоряющих потенциалах 10 кВ, 20 кВ, 30 кВ и токе пучка – 1 мА.

При фиксированном ускоряющем потенциале выбиралось оптимальное значение потенциала для фокусирующего электрода. Критериями оптимальности было выбрано коэффициент прохождения ЭП через пролетное отверстие анода, а также минимальный диаметр ЭП в кроссовере. Коэффициент прохождения определяется следующим соотношением:

$$K = \frac{N_m}{N_k}, \quad (3.1)$$

где  $N_k$  – количество эмитированных катодом электронов,  $N_m$  – количество электронов, прошедших через пролетное отверстие анода.

На рис. 3.6 приведены зависимости коэффициента прохождения  $K$  от величины фокусирующего потенциала для различных ускоряющих потенциалов.

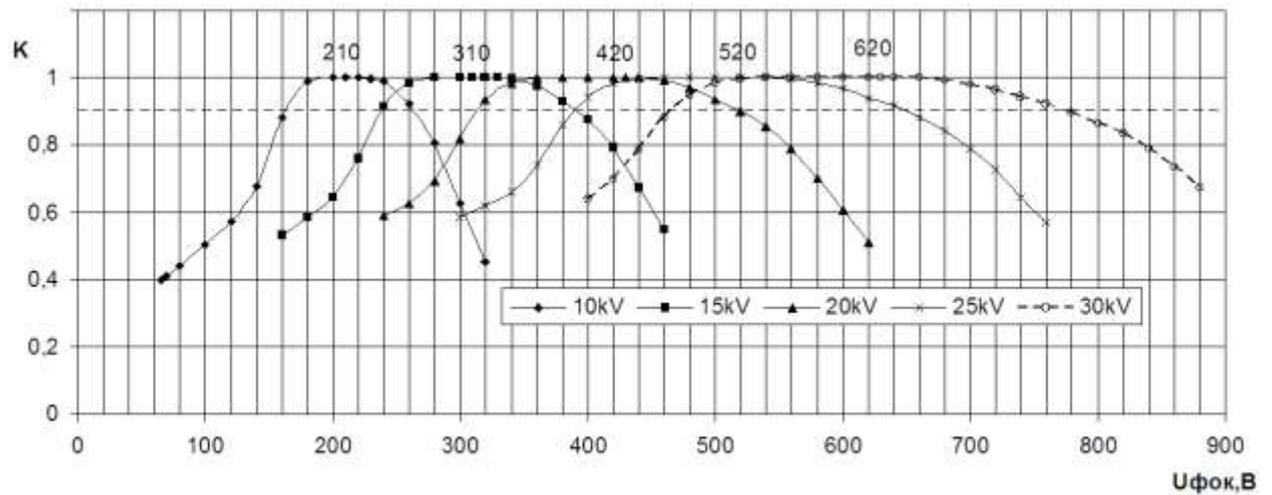


Рис. 3.6. Зависимости коэффициента прохождения от фокусирующего потенциала при разных ускоряющих потенциалах

На основе полученных данных (рис. 3.6) были определены оптимальные значения фокусирующего потенциала для разных ускоряющих потенциалов (таблица 3.2).

Таблица 3.2

#### Оптимальные значений фокусирующего потенциала

Ускоряющий потенциал, кВ	10	15	20	25	30
Оптимальный фокусирующий потенциал, В	210	310	420	520	620

Исходя из таблицы можно сделать вывод, что наблюдается линейная зависимость фокусирующего потенциала от ускоряющего потенциала (рис. 3.7).

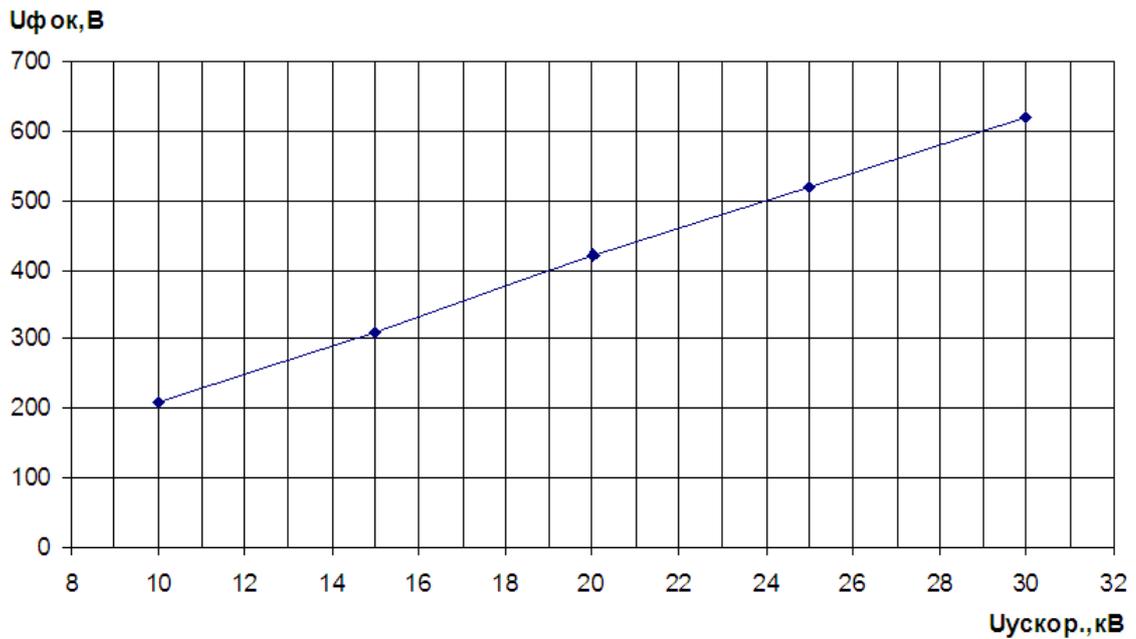


Рис. 3.7. Зависимость фокусирующего потенциала от ускоряющего потенциала

Было проведено исследование зависимости влияния пространственного заряда от величины тока пучка для различных ускоряющих потенциалов (рис. 3.8).

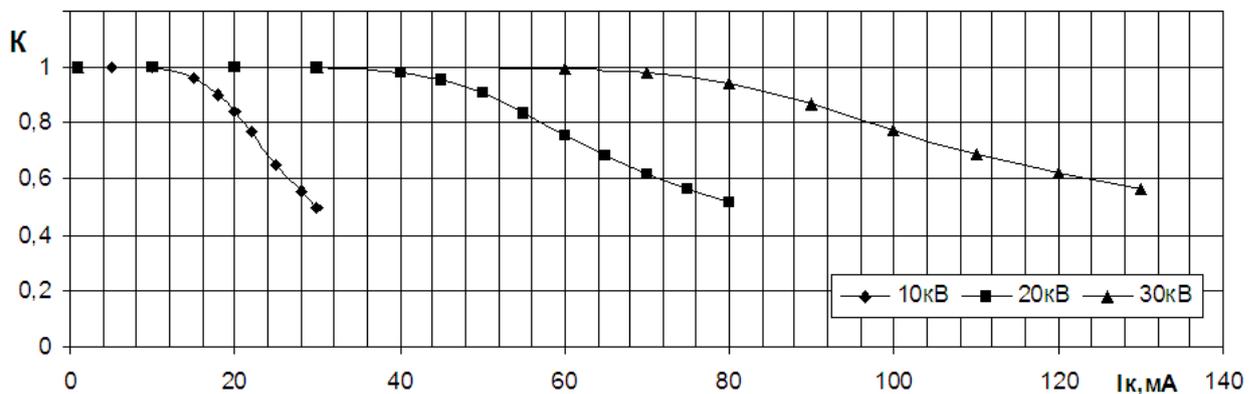


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента прохождения от величины тока пучка  $K = f(I_k)$

В результате было установлено, что для данной геометрической конфигурации ЭОС при заданных ускоряющих потенциалах и рабочем токе пучка равном 1 мА влияние пространственного заряда не наблюдается.

Также в ходе выполнения данной работы было проведено исследование размера ЭП в кроссовере в зависимости от ускоряющего потенциала в трехэлектродной ЭОС при оптимальных значениях фокусирующего потенциала (рис. 3.9).

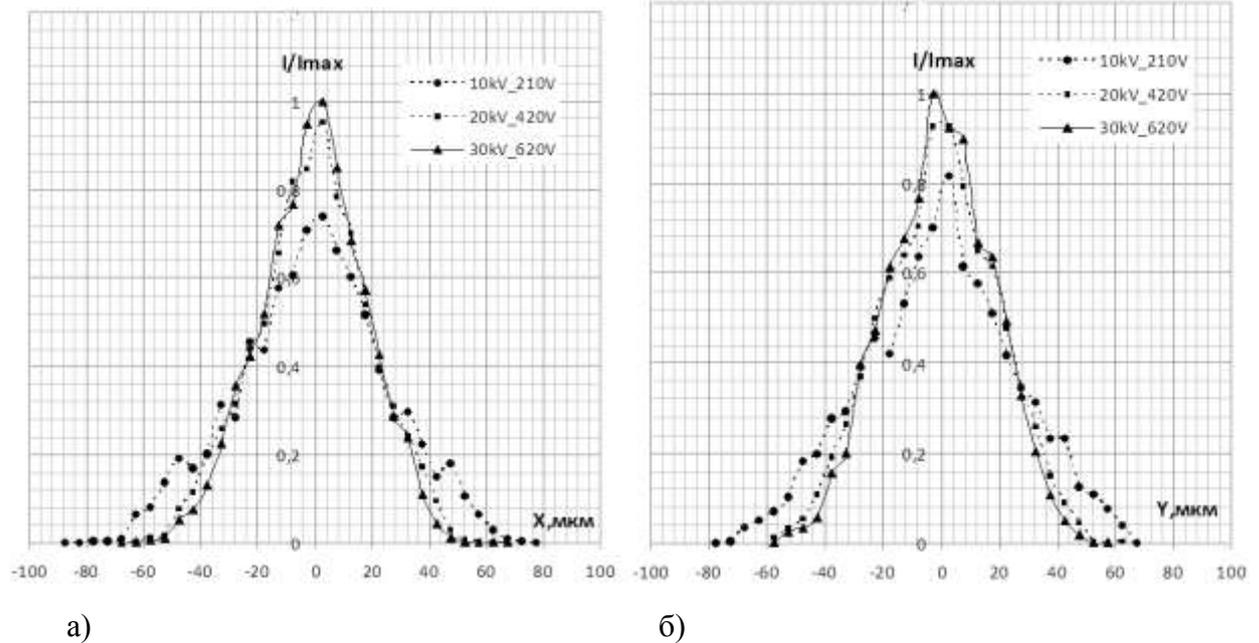


Рис. 3.9. Распределение тока пучка вдоль оси X (а) и Y (б) в плоскости перпендикулярной оси распространения пучка

Исследование размеров пучка в кроссовере показали, что для различных значений ускоряющих потенциалов при оптимальном фокусирующем потенциале профиль пучка по форме близок к нормальному распределению и на уровне  $0,5 I/I_{max}$  имеет размер  $0,04 \div 0,06$  мм, что качественно соответствует полученным для аналогичных ЭОС экспериментальным результатам [11,40].

## ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы была решена задача численного моделирования параметров ЭОС аксиально-симметричной трехэлектродной электронной пушки со сходящимся пучком предназначенной для использования в рентгеновских микротомографах и экспериментальных установках. Цель работы достигнута в результате применения методов геометрической оптики и интегрального исчисления. Основные практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выбрана конструкция ЭОС пушки на базе электронной пушки Пирса. Определена конфигурация фокусирующего электрода с диаметром пролетного отверстия 2 мм и углом наклона плоскости электрода к оси пучка равным  $60^\circ$ .

2. Используя критерий прохождения электронов через пролетное отверстие анода, определены оптимальные величины фокусирующих потенциалов для ускоряющих потенциалов в диапазоне  $10 \div 30$  кВ. Установлена зависимость фокусирующего потенциала от величины ускоряющего потенциала для данной конфигурации ЭОС.

3. При различных режимах работы ЭОС пушки определены размеры пучка в кроссовере, которые составляют  $0,04 \div 0,06$  мм при исходном диаметре эмитирующей поверхности катода 1 мм.

4. В результате траекторного анализа исследовано влияние пространственного заряда на динамику движения ЭП. Было установлено, что для рабочих режимов (ускоряющий потенциал  $10 \div 20$  кВ, ток пучка 1 мА) влиянием пространственного заряда можно пренебречь.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что выбранная конфигурация ЭОС пушки удовлетворяет предъявленным исходным требованиям поставленной задачи.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества : учеб. пособие [для инженерно–техн. спец. вузов] / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останкин – М. : Высшая школа, 1988.– 386 с.
2. Electron beam probe as a nondestructive single bunch diagnostic tool for circular colliders / P.V. Logatchov, P.A. Bak, A.A. Starostenko [et al]– BINP – Proceedings of RuPAC XIX, Dubna (Russia).– Novosibirsk.– 2004.– P 355–356.
3. Logatchov P.V. Low energy electron beam as a nondestructive diagnostic tool for high power beams / Logatchov P.V., Malyutin D.A., Starostenko A.A. // BINP – Proceedings of RuPAC XIX, Dubna (Russia). – Novosibirsk, 2006.– P 40–42.
4. Вайнштейн Л.А. Лекция по сверхвысокочастотной электронике / Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. – М. : Советское радио, 1973.– 400 с.
5. Вакуумная СВЧ электроника : Сборник обзоров.– Нижний Новгород : Институт прикладной физики РАН, 2002.– 160 с.
6. Сафин Д. Изобретен рентгеновский микротомограф, работающий на нанотрубках//Наука и техника.–2009 (<http://science.compulenta.ru/445256/>)
7. Андервуд Дж.Х., Аттвуд Д.Т. Возрождение рентгеновской оптики// Успехи физических наук. – 1987. – Т. 151, вып. 1.
8. Егоров В.К., Егоров Е.В., Кондаков А.С. Применение резерфордовского обратного рассеяния ионов для анализа плоских многослойных рентгеновских зеркал// Труды XV международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям (ESACCEL 2003). – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ.–2007. – С.47–56.
9. Kumakhov M.A. X-ray and neutron polycapillary optics: status and perspectives, Proc. SPIE Vol. 2859.–1996, p. 116–122.
10. Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Дрозденко Д.А. Поликапиллярная оптика как метод фокусировки рентгеновского излучения// Науково–технічна

- конференція фізика, електроніка та електротехніка (ФЕЕ–2011). – Суми: СумДУ. – 2011. – С. 69.
11. Барсук И.В., Дрозденко А.А., Дрозденко Д.А. Распознавание плотности электронного пучка // Материалы 6–й международной молодежной научно–технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ–2010)». – Севастополь: СевНТУ. – 2010. – С. 353
12. Погребняк А.Д. Термический отжиг с помощью электронного пучка и его влияние на структуру и фазовый состав гибридных покрытий / А.Д. Погребняк, Ю.А. Кравченко, В.С. Кшнякин // Вісник Сумського державного університету. Серія : Фізика, математика, механіка. – 2004. – № 10(69). – С. 182–169.
13. Кульментьева О.П. Влияние импульсной плазменной обработки и обработки сильноточным пучком электронов на структуру и свойства покрытий на основе никеля / О.П. Кульментьева, А.Д. Погребняк // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 6. – С. 35–56.
14. Установка с импульсным электронным пучком (GESA) для поверхностной обработки материалов / В. Энгелько, Г. Мюллер, А. Андреев [и др.] // Сб. докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (г. Санкт–Петербург, 1–4 октября, 2001), М. : ЦНИИ атоминформ. – 2001. – С. 412–415.
15. Л.Г. Шерстнев. «Электронная оптика и электронно–лучевые приборы» Учебник для студентов высших технических учебных заведений, – Москва, «Энергия», 1971г. – 367с.
16. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Советское радио, 1966. – 452 с.
17. А.А. Жигарев, Г.Г. Шамаева. «Электронно–лучевые и фотоэлектронные приборы» Учебник для вузов. – Москва : Высшая школа, 1982 г. – 463.

18. Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестёркин В.И. Электронно–оптические системы с сеточным управлением // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ.*– 1987.– №7.– 72 с.
19. Дрозденко А.А. Физика интенсивных электронных пучков в высокочастотных приборах О–типа: Дис. канд. физ–мат. наук. Сумы. 2009. – 130 с.
20. Дж. Лоусон. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.– 432 с.
21. Кулиш В.В. Физика лазеров на свободных электронах. Общие положения / ХПИ Сумский филиал. – Сумы, 1990. – 192 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИИТИ 5.09.90, №1526 – Ук90. – Реф. в: Гос. респ. научн.–техн. библи. УССР. – 1990.
22. Williams D.B., Carter C.D. *Transmission Electron Microscopy // A Textbook for Materials Science.* Plenum Press, New York, London, 1996, 729 p.
23. Пирс Дж.Р. Теория и расчет электронных пучков.– М.: Советское радио, 1956.– 216 с
24. Srinivasan–Rao T., Fischer J., Tsang T. Photoemission from Mg irradiated by short pulse ultraviolet and visible lasers // *J. Appl. Phys.* – 1995. – Vol. 77. – P. 1275–1279.
25. Spindt C.A., Holland C.E., Stowell R.D. Field emission cathode array development for high current density applications // *Appl. Surface Sci.*– 1983.– Vol.16.– P. 268–276.
26. John A.N., Schächter L., Mako F.M., Len L.K., Peter W., Cha–Mei Tang, Srinivasan–Rao T. *Advanced in cold cathode physics and technology // Proceedings of the IEEE.*– 1999.– Vol. 87.– N 5.– P. 865–889.
27. Светликина И.А., Иванова А.В., Кузнецова О.Ф. Электронные пушки. Часть III. Электронные пушки с острийными катодами. Электронные пушки для приборов М–типа, гиротронов, мазеров // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ.*– 1988.– №19.– 43 с.
28. С.И. Молоковский, А.Д. Сушков, Интенсивные электронные и ионные пучки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 303с.

29. В.П. Ильин, Численные методы решения задач электрофизики – М.: Наука. Физматлит, 1985. – 334с.
30. М. Силады, Электронная и ионная оптика. – М.: Мир, 1990. – 640с.
31. Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики / Бордовицына Т.В. – М.: Наука, 1984. – 136 с
32. Бордовицына Т.В., Быкова Л.Е., Бороненко Т.С. Численные и численно–аналитические алгоритмы прогнозирования движения ИСЗ. – Томск : ТГУ, 1991.– 156 с.
33. Митчелл Э. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными / Э. Митчелл, Р. Уэйт. – М.: Мир, 1981.– 213 с.
34. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 351 с.
35. А.Д. Полянин, А.И. Журов, В.Ф. Зайеев, Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. – М.: Физматлит, 2005. – 256с.
36. И.О. Арушанян, Численное решение интегральных уравнений методом квадратур: пособие для практикума на ЭВМ. – М.: МГУ, 2002. – 72с.
37. Г.И. Александров, Б.М. Заморозков, А.Ю. Калинин и др., Сер. 1. Электроника СВЧ 8 (108) – 1973.
38. T. Weiland, Electron. Commun. (AEU) 31, 3, 1977.
39. M. Clemens, T. Weiland, Progr. Electromagn. Res. 32, 65, 2001.
40. Belousov E.V., Vorobyov G.S., Drozdenko A.A., Korniyushchenko A.S., Korzh V.G., Shulga Y.V. Methods and tools of transient radiation registration for diagnostics of high–intensity electron beams // The European Physical Journal Applied Physics.– 2011. – № 55. – P. 11001 –11005.