

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ  
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Выполнил студент  
213 группы  
Пак Гитэ

Научный руководитель:  
Юров Дмитрий Сергеевич

Допущена к защите 05.06.2020г.

Зав.кафедрой

Москва

2020

# Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.....	5
1.1. Типы эмиссии электронных пушек.....	5
1.2. Принцип работы электронной пушки с термоэмиссией.....	7
1.3. Расчет электронной пушки в CST Studio .....	9
2. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ.....	11
2.1. Оптимизация расстояния между катодом и управляющим электродом.....	12
2.2. Влияние радиуса пролетного отверстия анода на параметры пучка.....	16
2.3. Оптимизация расстояния между управляющим электродом и анодом.....	17
2.4. Оптимизация длины управляющего электрода.....	18
2.5. Оптимизация длины анода.....	22
2.6. Оптимизация фокусирующего электрода.....	23
2.7. Зависимость параметров пучка от напряжения между управляющим электродом и катодом.....	27
2.8. Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре.....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	32
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	34

# ВВЕДЕНИЕ

Пучки заряженных частиц и электронные пучки широко используются в большом и постоянно увеличивающемся количестве научных приборов, электронных устройств и промышленных объектов. Неотъемлемой частью каждой электронно-оптической системы является электронная пушка, в которой генерируется пучок ускоренных электронов. Электронные пушки обычно используются для различных металлургических применений, таких как плавление, сварка, нанесение покрытий, отжиг, термическая обработка, поверхностное упрочнение, формирование сплавов и в атомной, молекулярной и поверхностной физике. Электронная пушка также является одной из важнейших частей ускорителей электронов. Роль электронной пушки - создание и формирование потока электронов в нужной форме для введения в ускоряющие поля. Хотя электронная пушка обычно составляет лишь небольшую часть всей системы, ее характеристики имеют решающее влияние на финальные параметры электронного пучка. Электронные пушки могут работать в непрерывном или импульсном режиме.

**Цель работы:** В НИИЯФ МГУ, начиная с 90-х годов, проводятся исследования, направленные на создание мощных линейных ускорителей электронов непрерывного действия S-диапазона (рабочая частота 2450 МГц). Важным этапом этих исследований было создание двухсекционного линейного ускорителя электронов непрерывного действия с энергией пучка, регулируемой в диапазоне 0,6 – 1,2 МэВ, и мощностью пучка до 60 кВт [1-3], а затем и полноценного прототипа промышленного ускорителя с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью пучка 25 кВт [4]. Данная диссертация посвящена развитию этого направления и описывает

результаты оптимизации электронной пушки для нового проекта промышленного ускорителя непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью пучка 175 кВт [5]. Данная мощность является рекордной для такого типа ускорителей и такой энергии, что определяет научную важность работы. Проектные параметры ускорителя приведены в Таблице 1.

Параметр	Значение
Энергия пучка	1,02±0,05 МэВ
Максимальная мощность ускоренного пучка	175 кВт
Рабочая частота	2450 МГц
Коэффициент захвата	~60%
Эффективное шунтовое сопротивление ускоряющей структуры	50,2 МОм/м
Выходная мощность клистрона	200 кВт
Электронный КПД	87,5%
Полный КПД	~40%
Габариты без системы вывода пучка в атмосферу	1300x800x1700 мм

Таблица 1. Проектные параметры ускорителя.

Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре позволили сформулировать требования на проектирование электронной пушки: она должна обеспечивать сходящийся пучок электронов с энергией 15.5 кэВ на входе в ускоряющую структуру. При обеспечении нужных параметров пучка на входе в ускоряющую структуру, коэффициент захвата будет составлять около 60%. При энергии ускоренного пучка 1 МэВ и мощности 175 кВт, ток пучка на выходе ускорителя должен составлять 175 мА. При коэффициенте захвата 60% ток пушки должен быть 290 мА. Регулировка мощности пучка, а значит и тока пушки должна осуществляться регулировкой напряжения на управляющем электроде от 0 до 3 кВ относительно потенциала катода.

# 1. Теоретические основы

## 1.1. Типы эмиссии электронных пушек

Электронная пушка - это устройство, с помощью которого получают пучок электронов с заданной кинетической энергией и заданной конфигурации. Чаще всего используется в кинескопах и других электронно-лучевых трубках, СВЧ-приборах (например, в лампах бегущей волны), а также в различных приборах, таких как электронные микроскопы и ускорители заряженных частиц. Работа электронной пушки возможна только в условиях глубокого вакуума, чтобы пучок электронов не рассеивался при столкновении с молекулами атмосферных газов.

Электронные пушки, применяемые в ускорительной технике, можно разделить по способу генерации электронов:

- 1) Электронные пушки с термоэлектронной эмиссией. Термоэмиссионные катоды, имеющие долгую историю разработки и использования, являются наиболее практичными источниками для приложений, которые требуют длительного срока службы и низкой скважности. Принцип работы пушек с термоэлектронной эмиссией следующий: катод нагревается с помощью специального нагревательного узла до высокой температуры  $\sim 1000$  °С. Электроны, эмитируемые катодом, составляют высокоэнергетичный хвост распределения Максвелла, с энергией, достаточной, чтобы преодолеть потенциальный барьер поверхности материала катода. Стандартными для ускорительных применений являются диспенсерные катоды, которые состоят из пористой подложки из тугоплавкого металла, содержащей соединения активных

материалов (преимущественно, барий). В процессе работы диспенсерного катода барий диффундирует к поверхности, уменьшая работу выхода.

- 2) Электронные пушки с фотоэмиссией. Фотоэмиссионные катоды долго использовались в электрооптических устройствах при низкой плотности тока. Появление высокоинтенсивных импульсных лазеров побудило к разработке фотокатодов для электронных пучков с высокой энергией и яркостью. Принцип работы фотокатода следующий: импульсы мощного лазерного излучения вырывают электроны с поверхности катода из материала с низкой работой выхода. Электронные пушки с фотоэмиссией имеют некоторые преимущества по сравнению с термоэлектронными. Среди них отсутствие нагревателя, что упрощает конструкцию пушки; более высокие значения максимальной плотности тока; большая яркость пучка, так как электроны имеют гораздо меньшие средние поперечные импульсы. Недостатки фотокатодов: наличие сложной лазерной системы; высокие требования к вакууму в пушке; невозможность работы с большими плотностями тока при низкой скважности из-за высокой средней мощности лазерного излучения.
- 3) Электронные пушки с автоэмиссией. На поверхности металлического катода при изготовлении формируются микровыступы, на которых под действием сильного электрического поля происходит взрывная автоэмиссия, приводящая к резкому нагреву микровыступов и формированию плазмы вблизи них. Так как работа выхода плазмы равна нулю, электронные пушки с автоэмиссией могут обеспечивать плотность тока свыше  $1000 \text{ А/см}^2$  [6]. Однако пушки данного типа являются исключительно импульсными устройствами.

В связи с высокими требованиями к надежности для промышленной установки, а также с необходимостью работы электронной пушки в непрерывном режиме единственным вариантом для данной диссертации является пушка с термоэлектронной эмиссией.

## 1.2. Принцип работы электронной пушки с термоэмиссией

Пример конструкции типичной термоэлектронной пушки в составе ускорителя показан на Рис. 1 без нагревательного узла. Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются в постоянном электрическом поле и выходят через пролетное отверстие в аноде, попадая затем в ускоряющую структуру ускорителя.

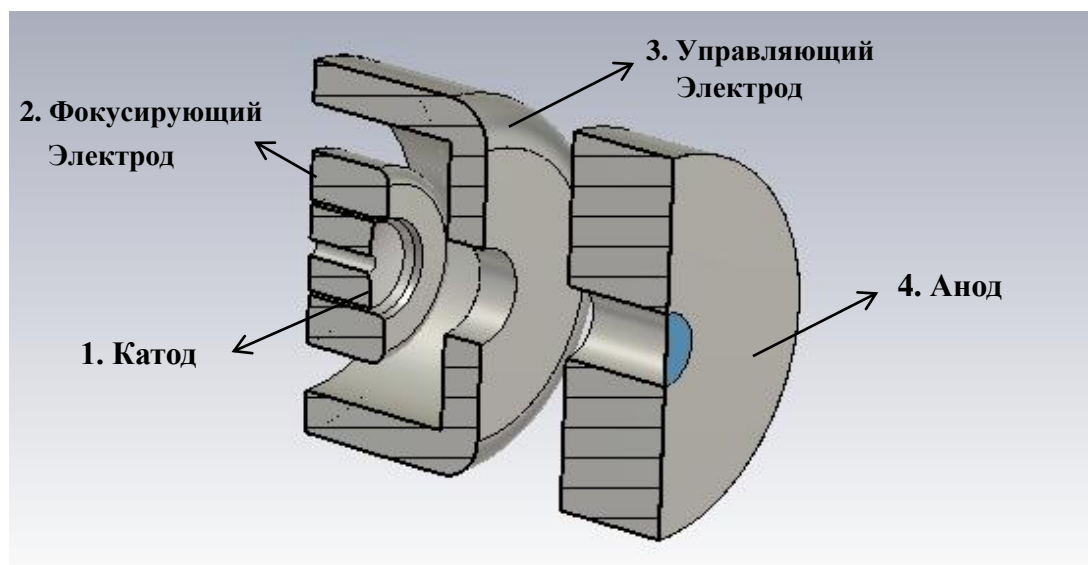


Рисунок 1. Пример термоэлектронной пушки. Показано поперечное сечение.

Напряжение между катодом и анодом, а соответственно, и энергия электронов на выходе электронной пушки определяется оптимальной динамикой пучка в ускоряющей структуре и является постоянной величиной в случае ускорителя, которому посвящена данная диссертация. Для регулировки тока пушки между катодом и анодом устанавливается

управляющий электрод. Фокусирующий электрод, находящийся под потенциалом катода, служит для формирования нужной сходимости и поперечных параметров пучка. Отверстие по центру катода нужно для того, чтобы избежать обратной бомбардировки.

Основное уравнение, описывающее плотность тока эмиссии терموкатода  $J_{eT}$  от его температуры и работы выхода – уравнение Ричардсона-Дешмана:

$$J_{eT} = AT^2 \exp\left(\frac{-e\varphi}{kT}\right) \quad (1)$$

где  $A$  - констант Ричардсона с теоретическим значением  $120 \text{ А/см}^2$ ,  $\varphi$  - работа выхода катода,  $T$  - температура катода. Данное уравнение описывает максимальную плотность тока эмиссии. В реальности поток электронов формирует пространственный заряд, который изменяет распределение потенциала в электронной пушке. При росте тока эмиссии электрическое поле вблизи катода падает. Ток эмиссии, при котором электрическое поле на поверхности катода упадет до нуля, при условии, что температуры катода достаточно для этого, будет максимальным током для данных значений потенциалов электродов, и называется током в режиме ограничения пространственным зарядом. Для идеального диода, состоящего из анода и катода, зависимость тока в режиме ограничения пространственным зарядом  $J_{sc}$  от напряжения между электродами  $U$  определяется законом Чайлда-Ленгмюра:

$$J_{sc} = gU^{3/2} \quad (2)$$

где  $g$  – постоянная для данной геометрии диода, называемая первеанс.

На практике электронные пушки работают в режиме ограничения пространственным зарядом для стабильности тока эмиссии.



### 1.3. Расчет электронной пушки в CST Studio

Разработка и оптимизация электронной пушки проводилась с использованием пакета программ CST [7]. В данном пакете имеется возможность параметризации геометрии для последующей ее оптимизации. Задача разработки и оптимизации решалась с использованием модуля E-static Solver (ES), который находит значение электростатических полей в каждой ячейке сетки, и модуля Particle Tracking Solver (PTS), который проводит интегрирование уравнений движения частиц в рассчитанных полях с учетом пространственного заряда.

Последовательность расчета следующая. На первом шаге с помощью модуля ES решается уравнение Лапласа с заданными граничными условиями, в результате чего определяется распределение электростатического поля в исследуемой области. Далее, с использованием модуля PTS выполняется расчет эмиссии частиц с катода. Тип катода выбирается в зависимости от типа эмиссии. Возможности модуля PTS позволяют моделировать следующие типы эмиссии: термоэлектронная эмиссия, эмиссия с любой плотностью тока, которую задает пользователь. Затем производится интегрирование уравнений движения эмитированных катодом частиц в электростатическом поле с учетом действия сил пространственного заряда. Рассчитанные траектории дают нулевое приближение для распределения пространственного заряда в исследуемом объеме, которое на следующем шаге используется модулем ES для решения уравнения Пуассона, после чего повторяется расчет эмиссии и траекторий с помощью модуля PTS. Итерационный цикл повторяется до достижения заданной точности расчета. При пересечении границы расчетной области расчет движения частиц прекращается, но сохраняется

информация для последующей обработки. Если частицы попадают в область проводника, то также прекращается процесс интегрирования уравнений движения и полей. Если же частицы попали обратно на катод, то они могут быть эмитированы снова.

В модуле PTS реализован метод «Виртуальный катод» для расчета эмиссии частиц. Поверхность катода разбивается на определенное количество ячеек сетки, которые проецируются на заранее выбранную виртуальную поверхность (Рис. 2).

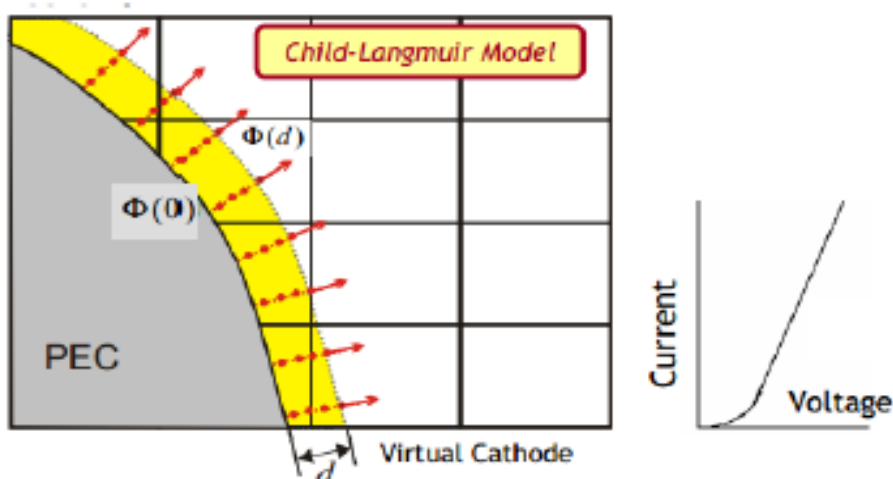


Рисунок 2. Серым цветом показана поверхность катода, желтым – область между поверхностью катода и виртуальной поверхности. Рисунок взят из [8].

Из разности потенциалов между ячейкой поверхности катода и ячейкой виртуальной поверхности, известной из решения уравнения Лапласа (данную операцию в нашем случае производит модуль ES), определяется плотность эмиссионного тока из закона Чайлда-Ленгмюра для плоского диода:

$$J_{sc} = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{1}{L^2} U^{3/2} \quad (3)$$

где  $U$  – разность между потенциалом виртуального катода и реального,

$L$  – расстояние между ячейкой виртуального катода и реального [9].

Как указано выше, для учета пространственного заряда в CST PTS реализован итерационный алгоритм («gun iteration algorithm» [9]). В каждой итерации алгоритма происходит расчет статических полей (интегрирования уравнения Пуассона), расчет тока эмиссии для полученного распределения потенциала, расчет траекторий частиц, далее вновь решение уравнения Пуассона с найденным распределением пространственного заряда. Расчет продолжается до тех пор, пока эмиссионный ток, полученный на предыдущей итерации, не совпадет с тем, который получен на текущей итерации с заданной пользователем точностью.

## 2. Оптимизация электронной пушки

В качестве начального варианта была взята геометрия электронной пушки, показанная на Рис. 3.

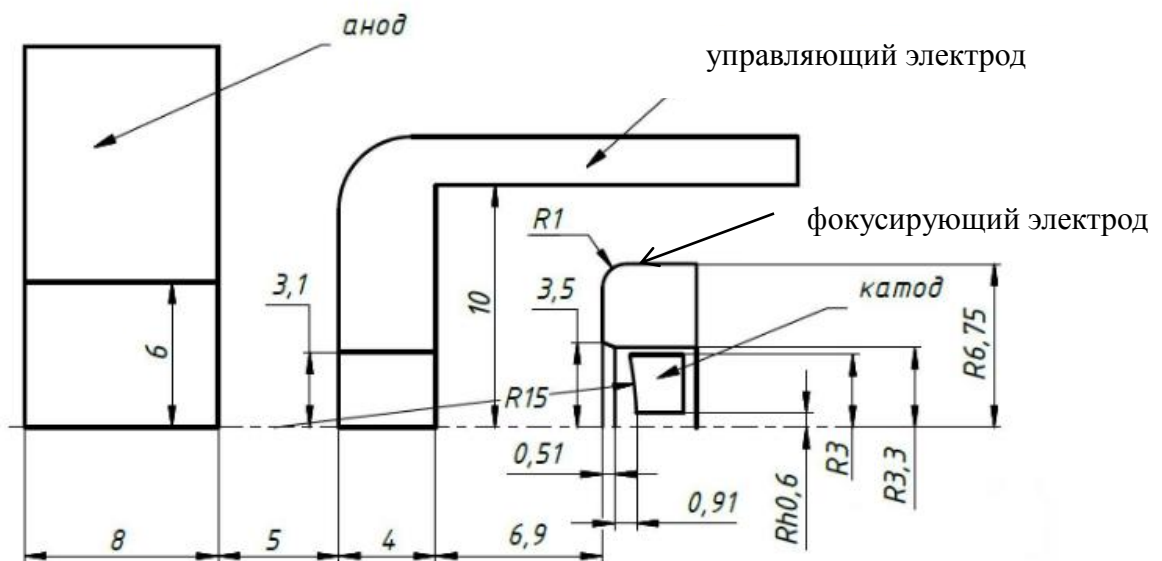


Рисунок 3. Начальный вариант геометрии электронной пушки.

Потенциалы катода и фокусирующего электрода были установлены равными -15.5 кВ, потенциал анода - равным нулю. Потенциал управляющего электрода изменялся для достижения нужного тока 290 мА.

На выходе анода был установлен монитор частиц в координатах  $(x, v_x)$ , где  $x$  – поперечная координата, для проверки поперечного распределения частиц пучка.

Температура катода была установлена равной 1200 К, а работа выхода равной 1.8 эВ. В процессе симуляции проверялось, что пушка работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом.

В процессе оптимизации на первом этапе изменялось положение управляющего электрода для обеспечения требуемого тока при напряжении между катодом и управляющим электродом  $U_{el}$  не более 3 кВ. Далее оптимизировались радиусы анода и управляющего электрода, положение анода, форма фокусирующего электрода для получения нужной сходимости пучка. Затем проверялась работа электронной пушки для промежуточных напряжений между управляющим электродом и катодом от 0 до 3 кВ. И далее рассчитывалась динамика пучка для различных напряжений между управляющим электродом и катодом с целью проверки получения нужного коэффициента захвата и выяснения возможных режимов работы ускорителя с данной конфигурацией электронной пушки.

## **2.1. Оптимизация расстояния между катодом и управляющим электродом**

Для получения нужного тока пушки изменялось расстояние между управляющим электродом и катодом, так как именно оно, наряду с напряжением между этими элементами, главным образом влияет на ток. В

Таблице 2 приведены параметры пучка на выходе электронной пушки в зависимости от расстояния  $L_{c\_el}$  между управляющим электродом и катодом: ток пушки  $I_{gun}$  и диаметр пучка  $d$ .

$L_{c\_el}$ , мм	$I_{gun}$ , мА	$d$ , мм
8,32	97	3,6
7,92	101	4,0
7,42	108	3,8
6,92	116	3,8
6,42	126	4,0
5,92	140	4,0
5,42	158	4,2
4,92	181	4,4
4,42	214	4,6
3,92	262	5,0
3,42	325	5,4

Табл. 2. Параметры пучка в зависимости от расстояния между управляющим электродом и катодом.

На Рис. 4, 5 показаны траектории электронов при  $L_{c\_el} = 8,32$  и 3,42 мм, соответственно. Остальные расстояния соответствуют Рис. 3.

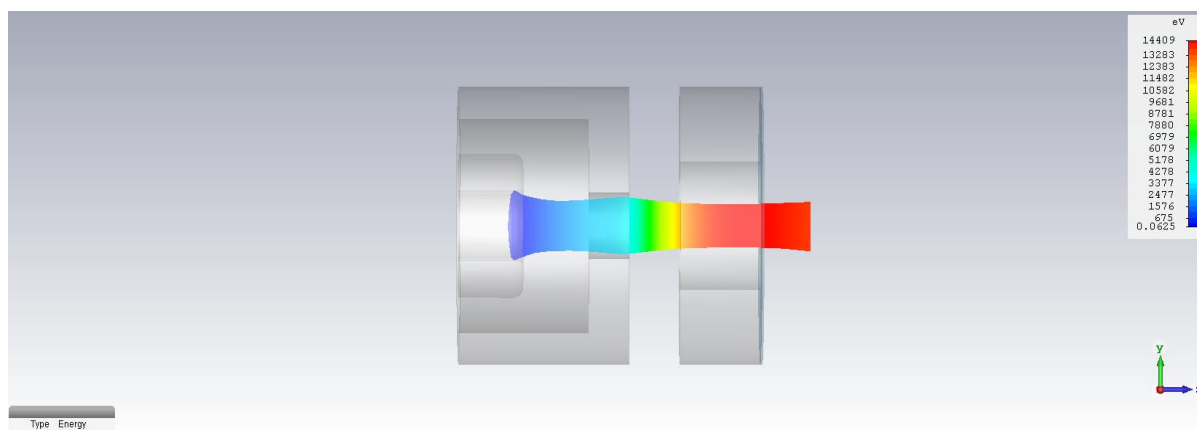


Рис. 4. Траектории электронов при  $L_{c\_el} = 8,32$  мм.

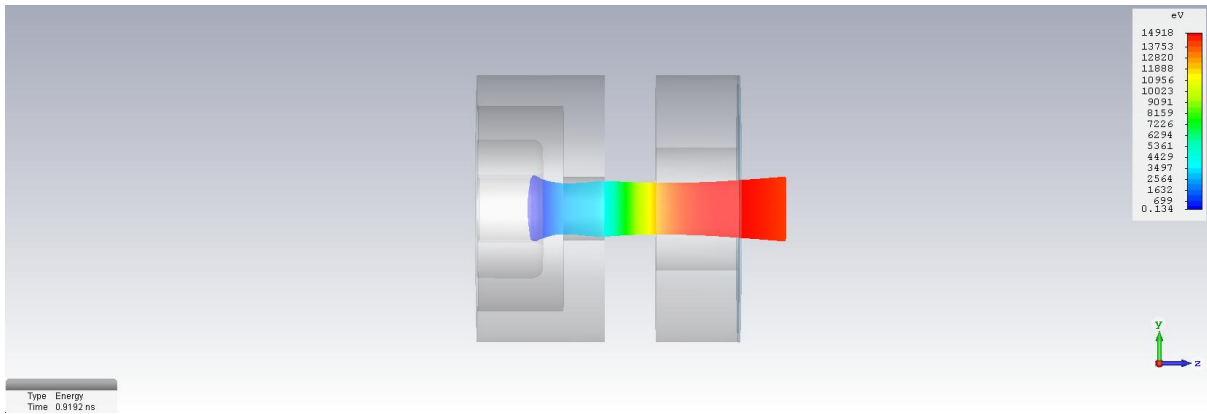


Рис. 5. Траектории электронов при  $L_{c\_el} = 3,42$  мм.

На Рис. 6 показана зависимость тока пушки  $I_{gun}$  от расстояния между катодом и управляющим электродом.

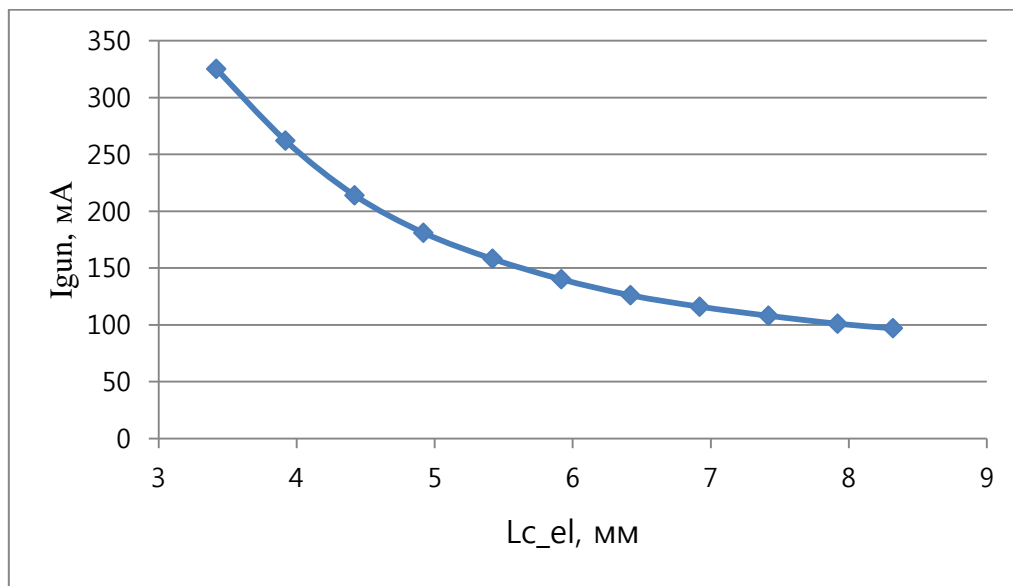


Рис. 6. Зависимость тока пушки от расстояния между катодом и управляющим электродом.

Видно, что нужное значение тока 290 мА достигается при потенциале управляющего электрода относительно катода 3 кВ и  $L_{c\_el} \approx 3,65$  мм. При этом пучок является расходящимся, что не является оптимальным с точки зрения дальнейшей динамики пучка в ускоряющей структуре.

Так как основные параметры, влияющие на ток пушки, это расстояние между управляющим электродом и катодом и напряжение между ними, в дальнейших вычислениях они были зафиксированы на значениях  $U_{el} = 2,75$  кВ и  $L_{c\_el} = 3,42$  мм. Эти параметры обеспечат в дальнейших вычислениях нужный ток около 290 мА.

Элементы электронной пушки формируют с точки зрения оптики пучка последовательность собирающих и рассеивающих линз. Рис. 7 иллюстрирует эту мысль. На нем изображено распределение электростатического потенциала в пространстве пушки.

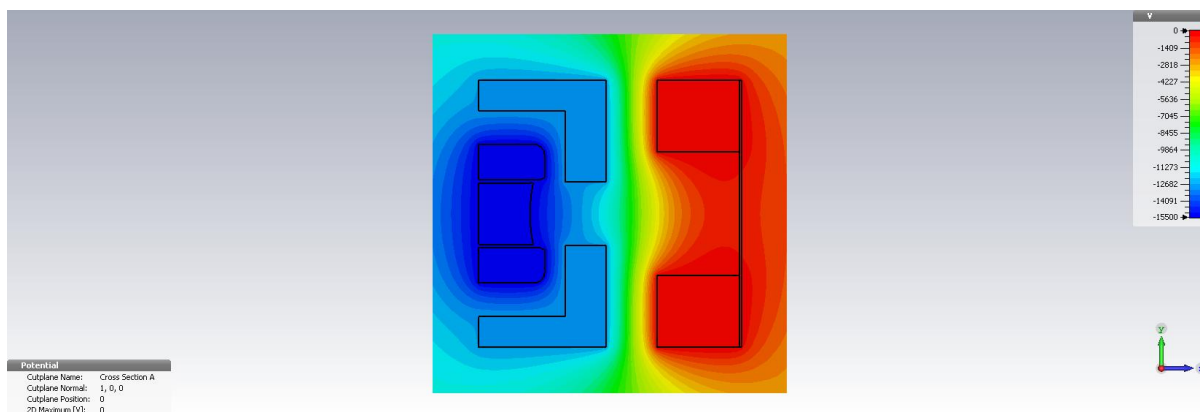


Рис. 7. Распределение электростатического потенциала в пространстве пушки.

Видно, что сначала катод и фокусирующий электрод фокусируют пучок, затем краевые поля управляющего электрода на передней и задней кромке сначала рассеивают пучок электронов, потом снова собирают. В конце краевые поля пролетного отверстия анода опять дефокусируют пучок. Таким образом, на поперечную динамику пучка электронов в пушке оказывают влияние все ее элементы, и добиваться финальной сходимости пучка можно пытаться разными способами.

## 2.2. Влияние радиуса пролетного отверстия анода на параметры пучка

Рис. 5 показывает, что кроме сходимости пучка имеется еще одна проблема в расчетах: энергия электронов на выходе анода заметно меньше 15,5 кэВ (около 14,9 кэВ). Причину данного явления можно также понять исходя из распределения потенциала на Рис. 7: радиус пролетного отверстия анода сравним с его длиной, из-за чего краевые поля не дают пучку набрать все 15,5 кэВ к концу анода.

Чтобы решить эту проблему была проведена оптимизация радиуса пролетного отверстия анода  $R_a$ . Он менялся от начальных 6 мм до 2,5 мм. При меньшем радиусе начинались потери электронов на аноде. На Рис. 8 показана зависимость энергии электронов на выходе электронной пушки от радиуса анода.

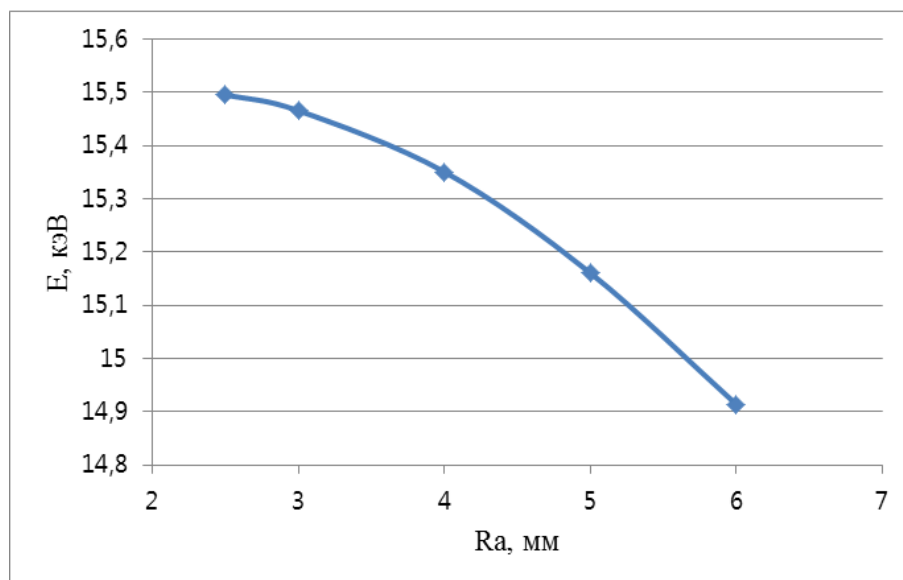


Рис. 8. Зависимость энергии электронов на выходе пушки от радиуса анода.

Изменения тока пучка и его сходимости при этом незначительны. На Рис. 9 приведены траектории электронов при  $R_a = 2,5$  мм. Это значение было зафиксировано для дальнейших расчетов.



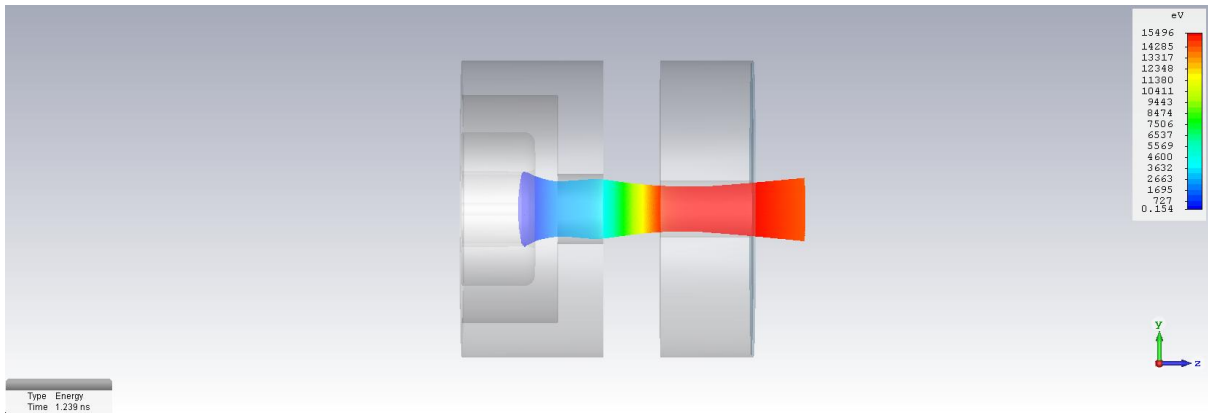


Рис. 9. Траектории электронов при  $R_a = 2,5$  мм.

### 2.3. Оптимизация расстояния между управляющим электродом и анодом

Расстояние между управляющим электродом и анодом  $L_{el_a}$  слабо влияет на ток пучка. На Рис. 10 показана данная зависимость.

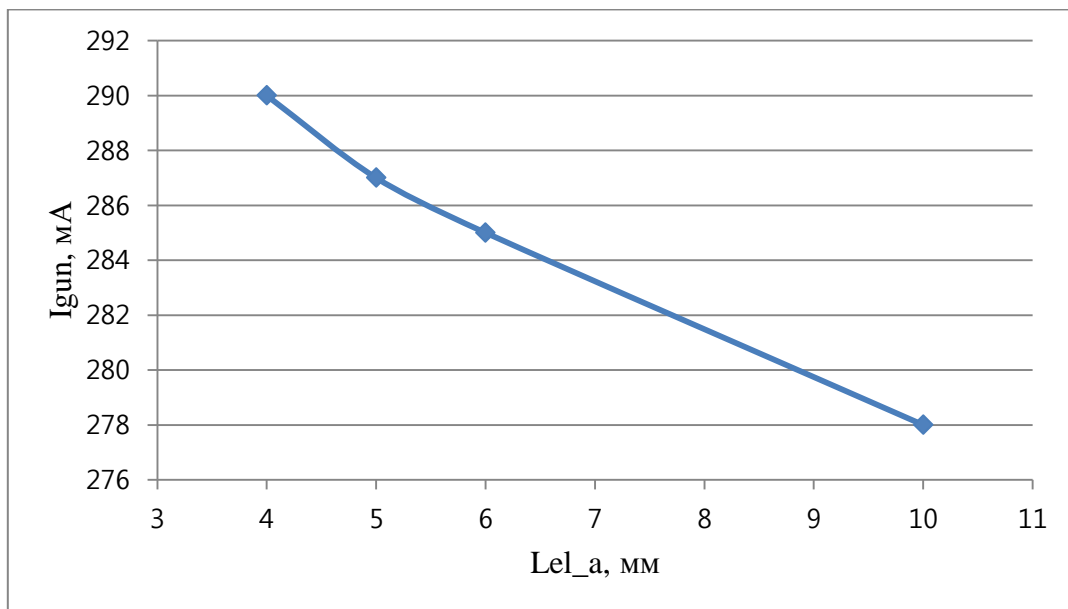


Рис. 10. Зависимость тока пушки от расстояния между управляющим электродом и анодом.

Однако при увеличении  $L_{el_a}$  увеличивается длина пространства

дрейфа, на котором частицы пучка расталкиваются за счет пространственного заряда. Данный факт иллюстрирует Рис. 11, на котором изображены траектории электронов при  $L_{el\_a} = 10$  мм.

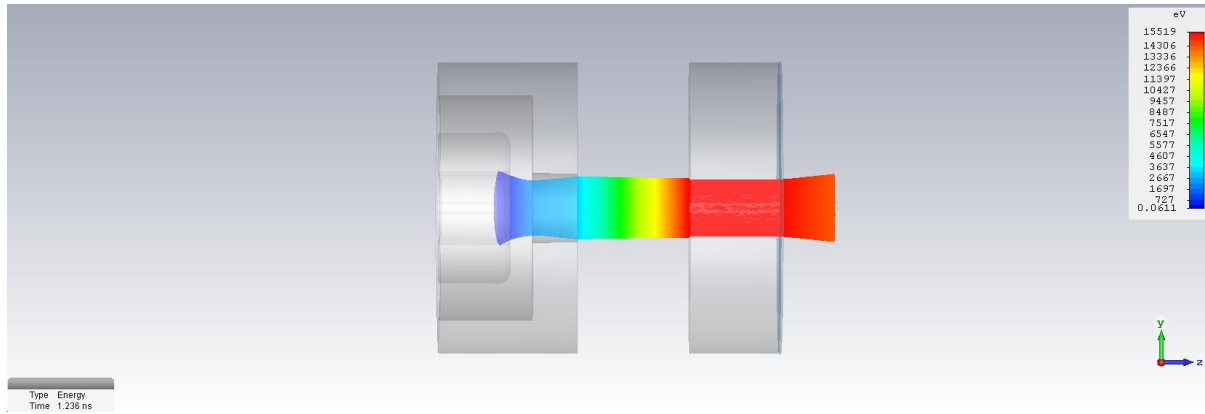


Рис. 11. Траектории электронов при  $L_{el\_a} = 10$  мм.

К аноду пучок расширяется настолько, что часть электронов оседает на нем. Для дальнейших расчетов было оставлено значение  $L_{el\_a} = 5$  мм.

## 2.4. Оптимизация длины управляющего электрода

Изучение распределения электростатического потенциала на Рис. 7 показывает, что ближний к катоду край управляющего электрода формирует рассеивающую линзу. Можно предположить, что для увеличения сходимости пучка на выходе электронной пушки можно попытаться уменьшить длину управляющего электрода  $L_{el}$ . В этом случае анод оказывает все большее влияние на область между управляющим электродом и катодом, снижая влияние рассеивающей линзы.

На Рис. 12 изображено распределение электростатического потенциала в пушке при  $L_{el} = 1,5$  мм, подтверждающее эту мысль.

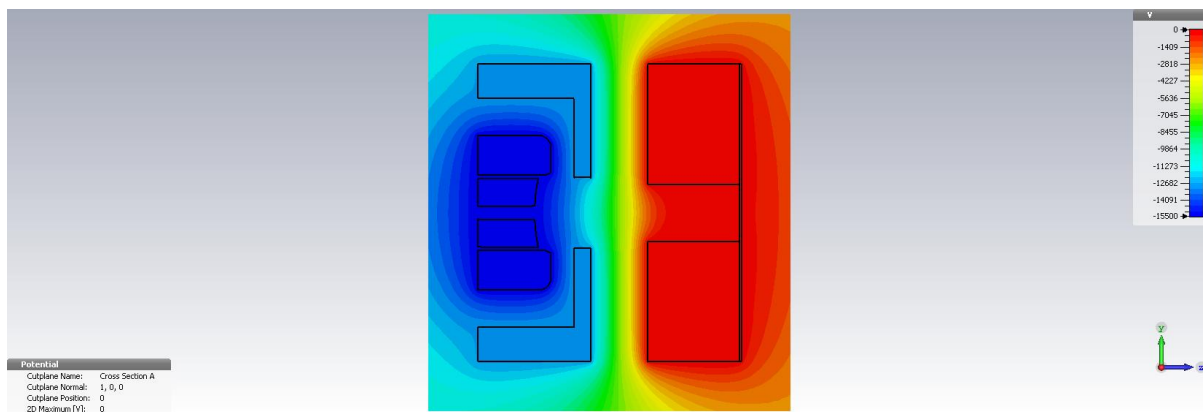


Рис. 12. Распределение электростатического потенциала в пространстве пушки.

На Рис. 13, 14 показаны траектории электронов при  $L_{el} = 4$  мм и 1,5 мм, соответственно.

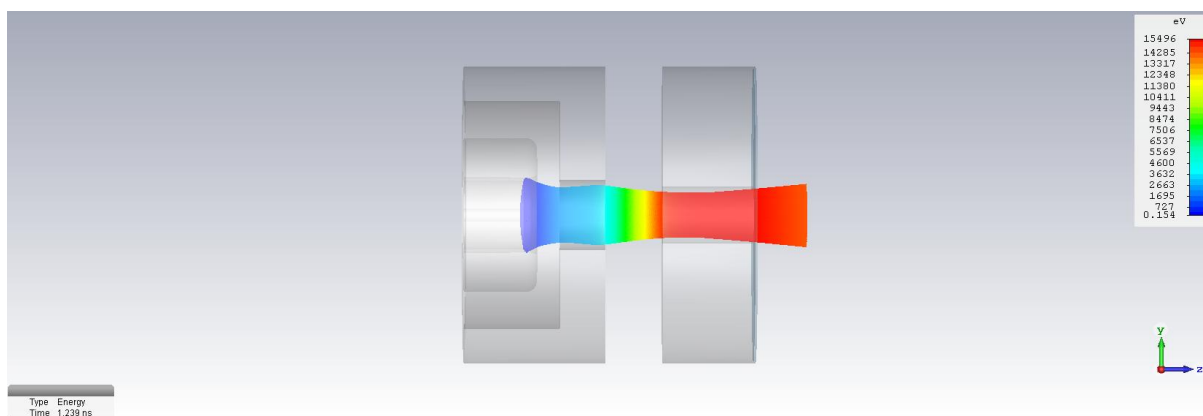


Рис. 13. Траектории электронов при  $L_{el} = 4$  мм.

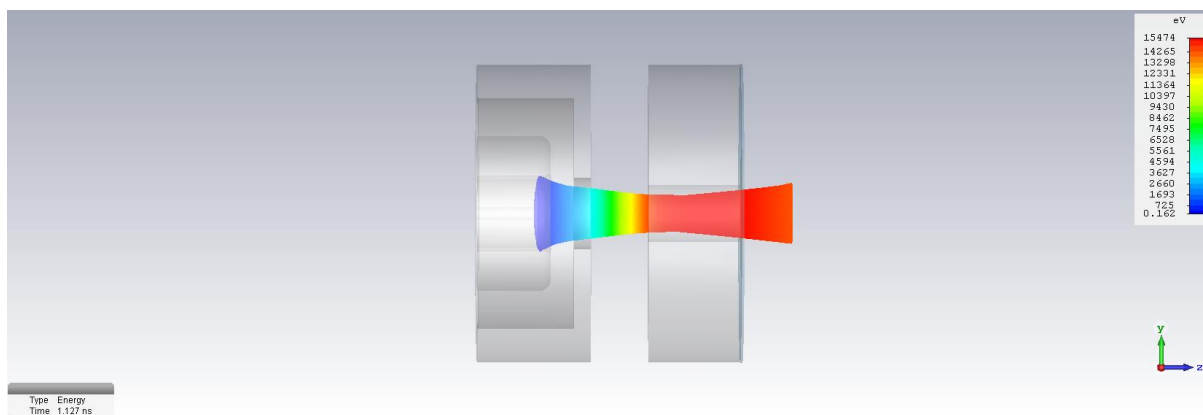


Рис. 14. Траектории электронов при  $L_{el} = 1,5$  мм.

Из рисунков видно, что при  $L_{el} = 1,5$  мм уже наблюдается перефокусировка пучка. Кроме того при уменьшении длины управляющего электрода за счет увеличивающегося влияния на катод поля анода растет ток пушки. При  $L_{el} = 1,5$  мм для  $U_{el} = 2,75$  кВ он составляет 345 мА. Поэтому при уменьшении длины управляющего электрода необходимо также уменьшать напряжение на нем относительно катода для сохранения требуемого значения тока 290 мА. При этом влияние пространственного заряда на расходимость пучка будет падать, и он будет еще более перефокусирован, чем изображено на Рис. 14. На Рис. 15 показана зависимость тока пушки от длины управляющего электрода.

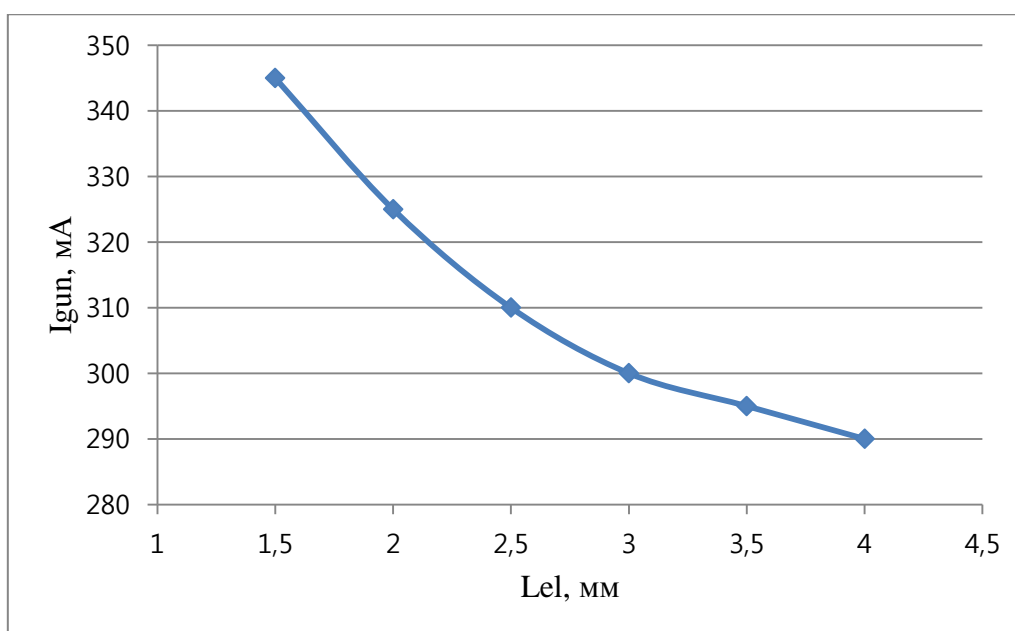


Рис. 15. Зависимость тока пушки от длины управляющего электрода.

На Рис. 16, 17 приведены зависимости среднеквадратичного размера  $x_{rms}$  и среднеквадратичного угла  $x'_{rms}$  в поперечном распространении пучка направлении в выходной плоскости анода в зависимости от длины управляющего электрода.

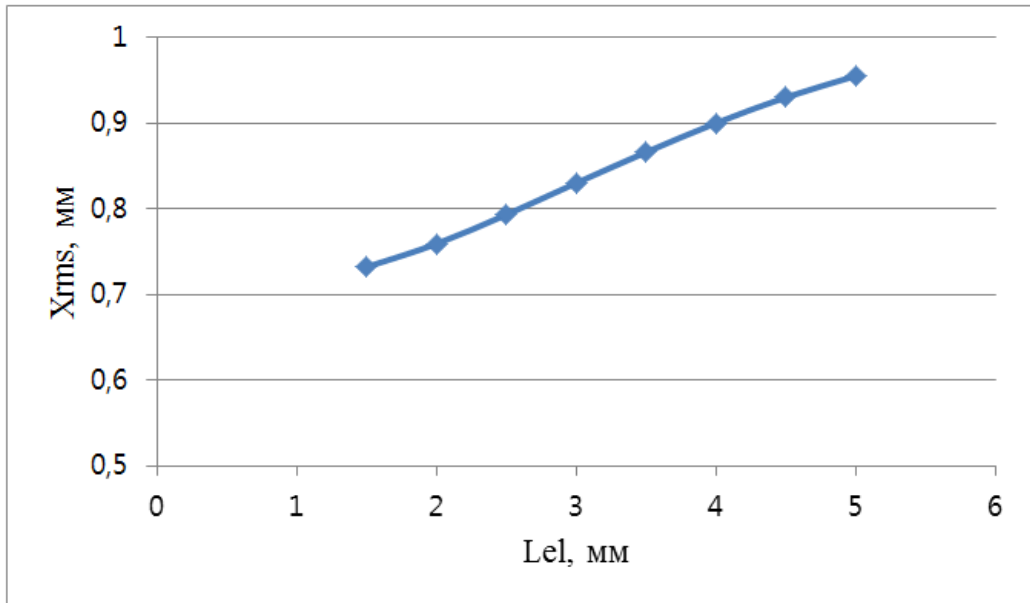


Рис. 16. Зависимость среднеквадратичного поперечного размера пучка на выходе электронной пушки от длины управляющего электрода.

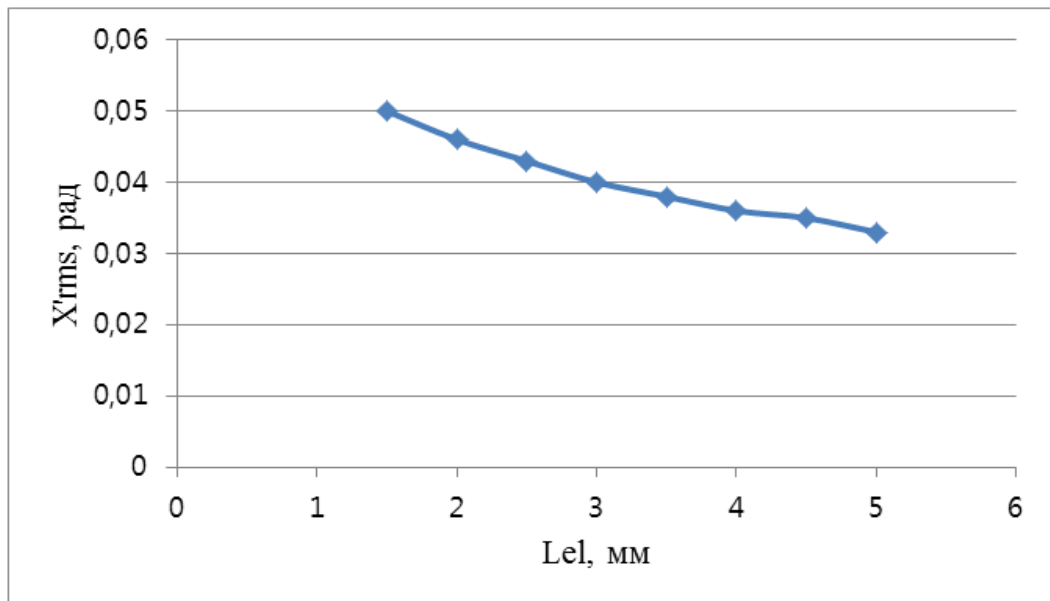


Рис. 17. Зависимость среднеквадратичного поперечного угла пучка на выходе электронной пушки от длины управляющего электрода.

Графики показывают, что с уменьшением длины управляющего электрода пучок на выходе электронной пушки становится уже, но имеет большую расходимость. Учитывая все вышеприведенные соображения, в качестве компромиссного значения было выбрано  $L_{el} = 3,5$  мм.

## 2.5. Оптимизация длины анода

Из Рис. 13 видно, что кроссовер пучка находится примерно в середине анода. Для того чтобы он располагался ближе к входу в ускоряющую структуру, можно попробовать уменьшить длину анода. На Рис. 18 показана зависимость среднеквадратичного размера пучка от  $L_a$ .

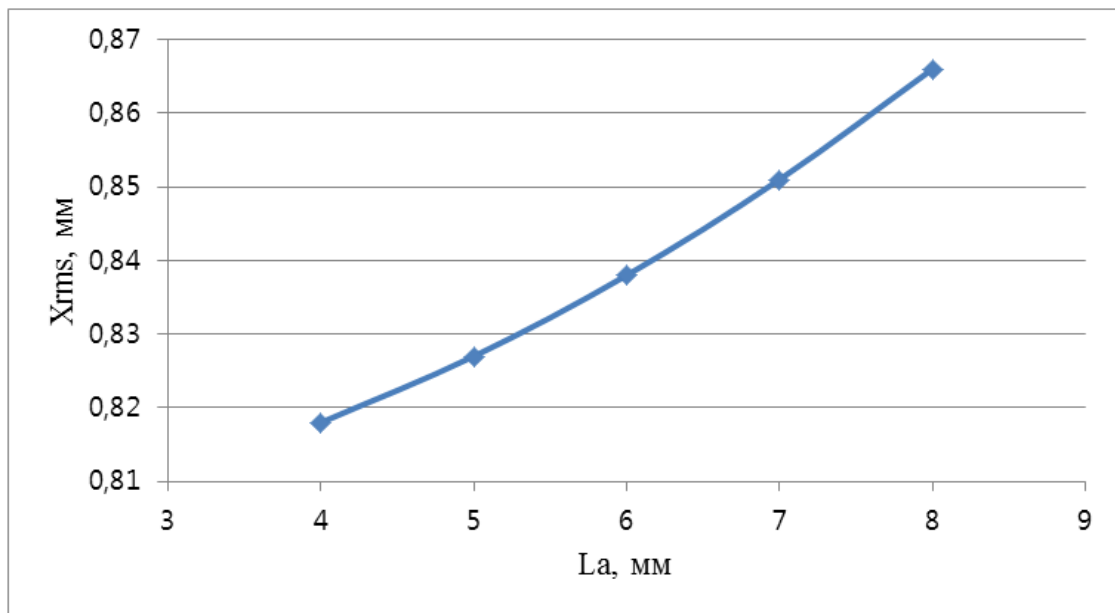


Рис. 18. Зависимость среднеквадратичного поперечного размера пучка на выходе электронной пушки от длины анода.

На Рис. 19 показаны траектории электронов в пушке при  $L_a = 4$  мм.

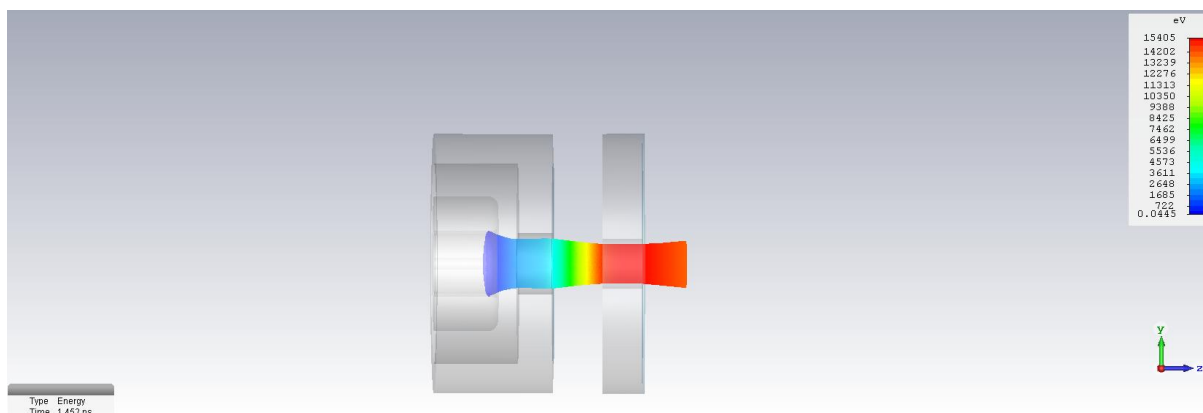


Рис. 19. Траектории электронов при  $L_a = 4$  мм.

Кроссовер пучка при  $L_a = 4$  мм находится близко к выходу анода. При этом ток пучка не меняется, среднеквадратичный угол также остается практически неизменным. Для дальнейшей оптимизации фиксировалось данное значение длины анода.

## 2.6. Оптимизация фокусирующего электрода

Геометрию, полученную к данному этапу, можно считать первым приближением в оптимизации электронной пушки. Полученные параметры пучка достаточно хорошо удовлетворяют заданным требованиям. Однако параметры пучка можно немного улучшить в плане его сходимости.

Сравнение Рис. 4, 5 показывают, что для лучшей сходимости пучка на выходе электронной пушки выгодно иметь большее расстояние между катодом и управляющим электродом. Но чтобы увеличить его, требуется каким-то образом компенсировать падение тока пушки.

В первую очередь напряжение между управляющим электродом и катодом было выставлено на максимальное по условиям задачи значение: 3 кВ, а радиус управляющего электрода уменьшен с 3,1 до 2,8 мм. Это позволило отодвинуть управляющий электрод на 0.5 мм от катода.

Затем фокусирующий электрод был отодвинут ближе к катоду на 0.2 мм. Фокусирующий электрод имеет значительное влияние на ток пушки и траектории электронов. Изменение положения и формы фокусирующего электрода позволило отодвинуть управляющий электрод еще на 0.5 мм от катода.

На Рис. 21-24 показано влияние этих изменений на пучок по точкам.

В Таблице 3 указана расшифровка параметров этих точек. На Рис. 20 показаны обозначения геометрических размеров электронной пушки.

№	$L_{c\_el}$ , мм	$Z_f$ , мм	$\alpha$ , град.	$x_{rms}$ , мм	$x'_{rms}$ , рад	$I_{gun}$ , мА	$\epsilon_{rms}$ , мм*мрад
1	3,42	1,42	112	0,906	0,0365	355	30,31
2	3,67	1,42	112	0,857	0,0362	313	29,17
3	3,92	1,42	112	0,816	0,0361	278	28,15
4	3,92	1,22	112	0,905	0,0325	334	28,06
5	4,12	1,22	112	0,876	0,0322	307	27,37
6	4,22	1,22	112	0,863	0,0321	295	27,03
7	4,22	1,22	105	0,844	0,0327	283	26,85

Табл. 3. Оптимизация сходимости пучка.

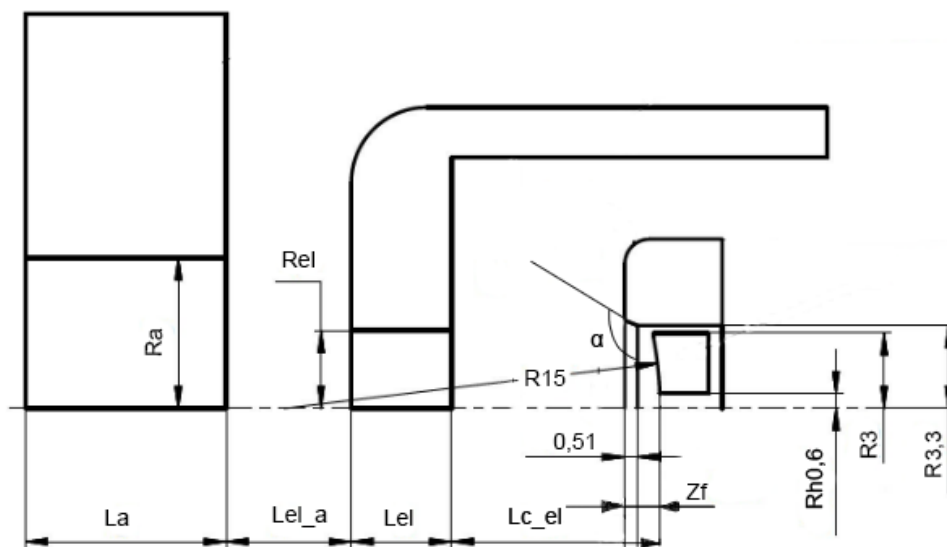


Рис. 20. Неизменные размеры пушки и обозначения изменяемых размеров.



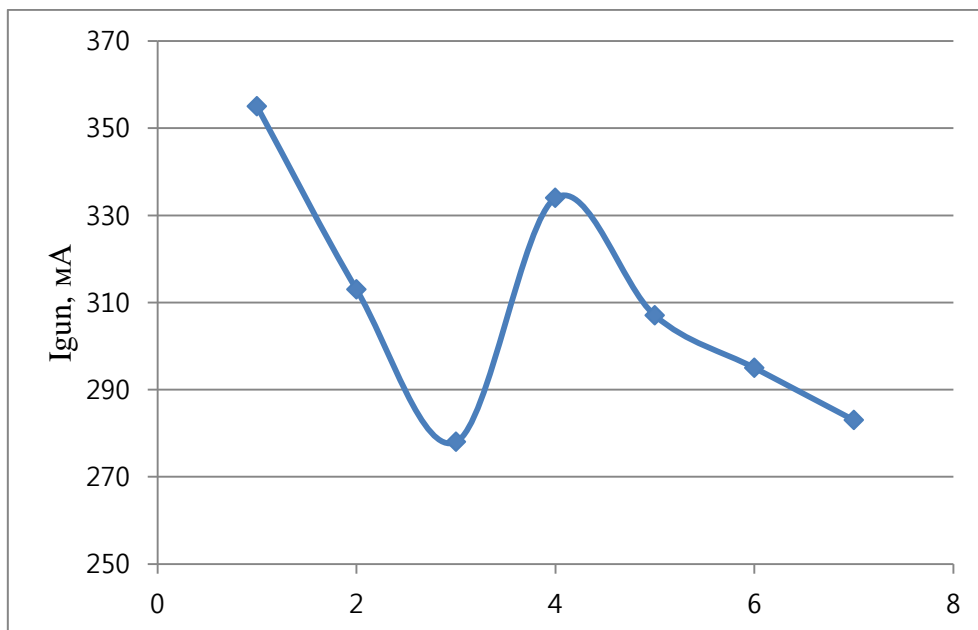


Рис. 21. Изменение тока пушки во время оптимизации сходимости пучка по шагам.

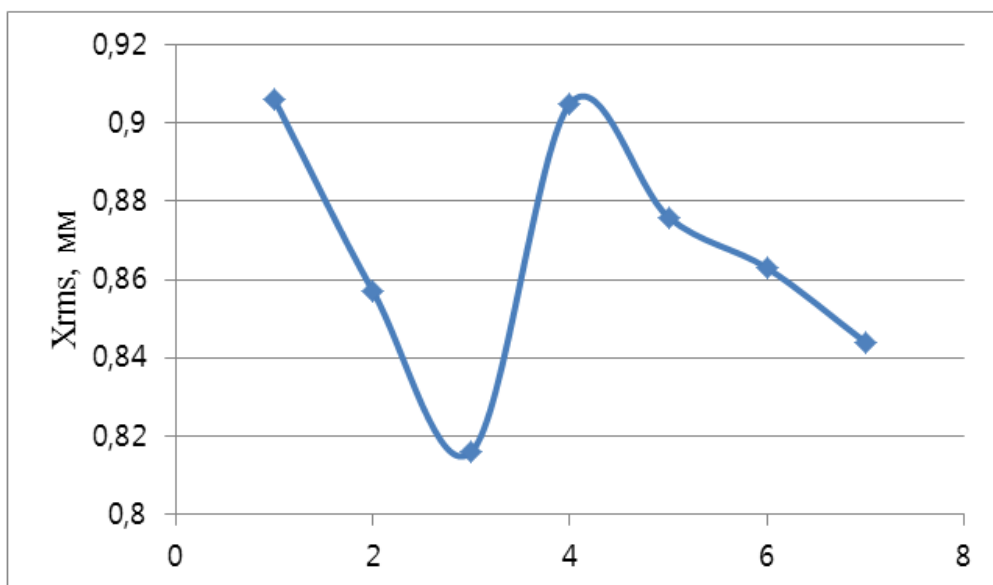


Рис. 22. Изменение среднеквадратичного поперечного размера пучка во время оптимизации сходимости пучка по шагам.

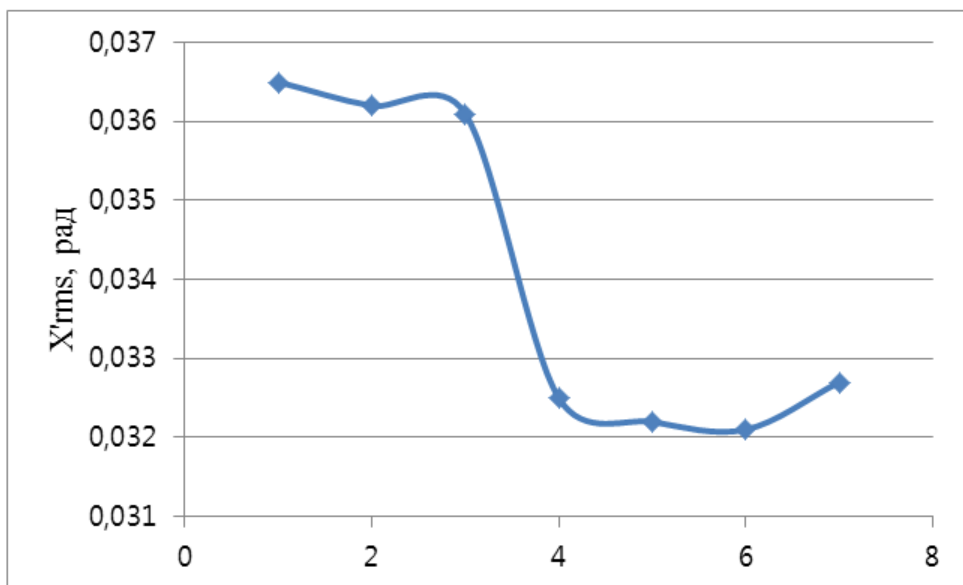


Рис. 23. Изменение среднеквадратичного угла электронов пучка во время оптимизации сходимости пучка по шагам.

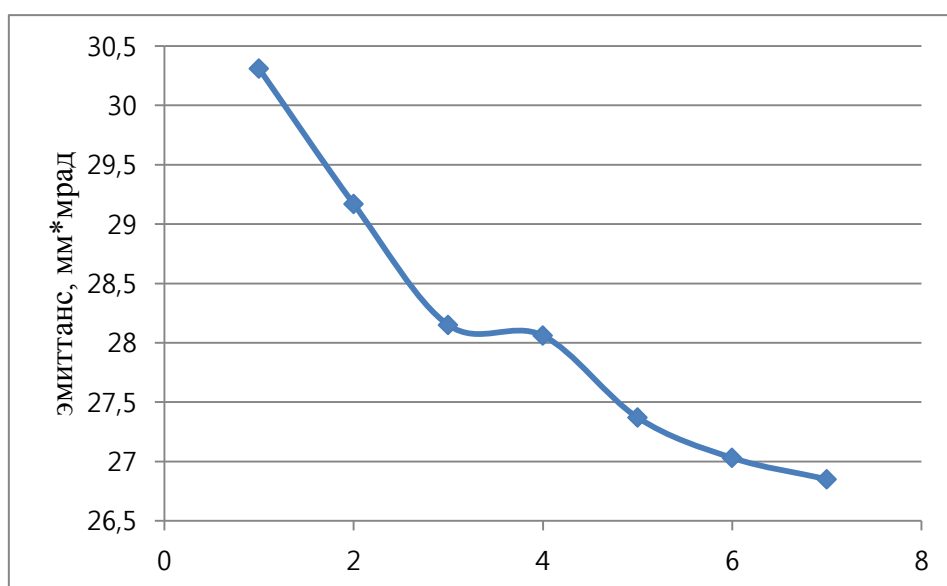


Рис. 24. Изменение эмиттанса пучка во время оптимизации сходимости пучка по шагам.

Графики показывают заметное улучшение параметров пучка: уменьшение размера, эмиттанса и угловой расходимости. На Рис. 25 приведены траектории электронов на финальном шаге оптимизации при напряжении на управляющем электроде относительно катода 3 кВ.

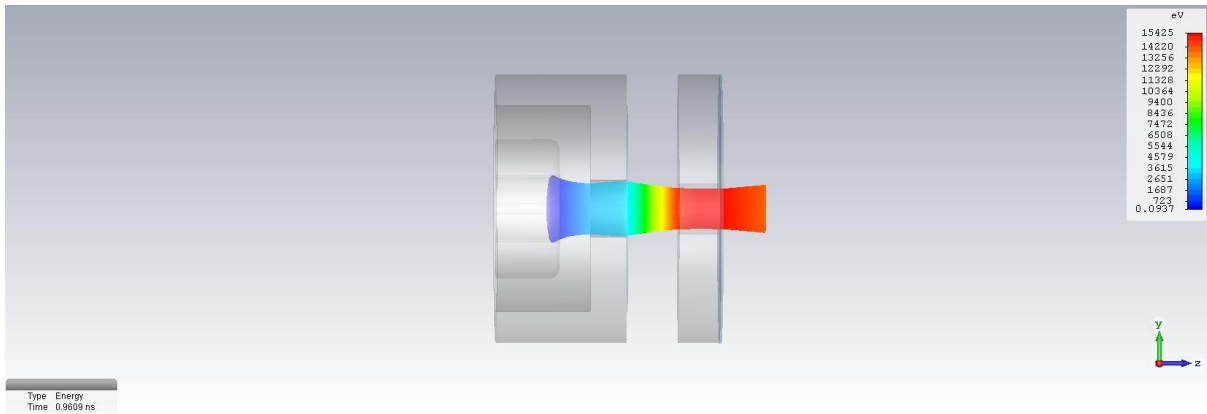


Рис. 25. Траектории электронов в конце оптимизации при  $U_{el} = 3$  кВ.

## 2.7. Зависимость параметров пучка от напряжения между управляющим электродом и катодом

После оптимизации геометрии электронной пушки при проектном токе пушки были проведены расчеты параметров пучка в зависимости от напряжения между управляющим электродом и катодом. Эти расчеты в сочетании с расчетами динамики пучка в ускоряющей структуре определяют, в каком диапазоне можно будет регулировать мощность пучка ускорителя.

На Рис. 26, 27 показаны зависимости тока пушки и среднеквадратичного размера пучка от напряжения на управляющем электроде. Зависимость тока пушки от  $U_{el}$  близка к закону  $3/2$ .

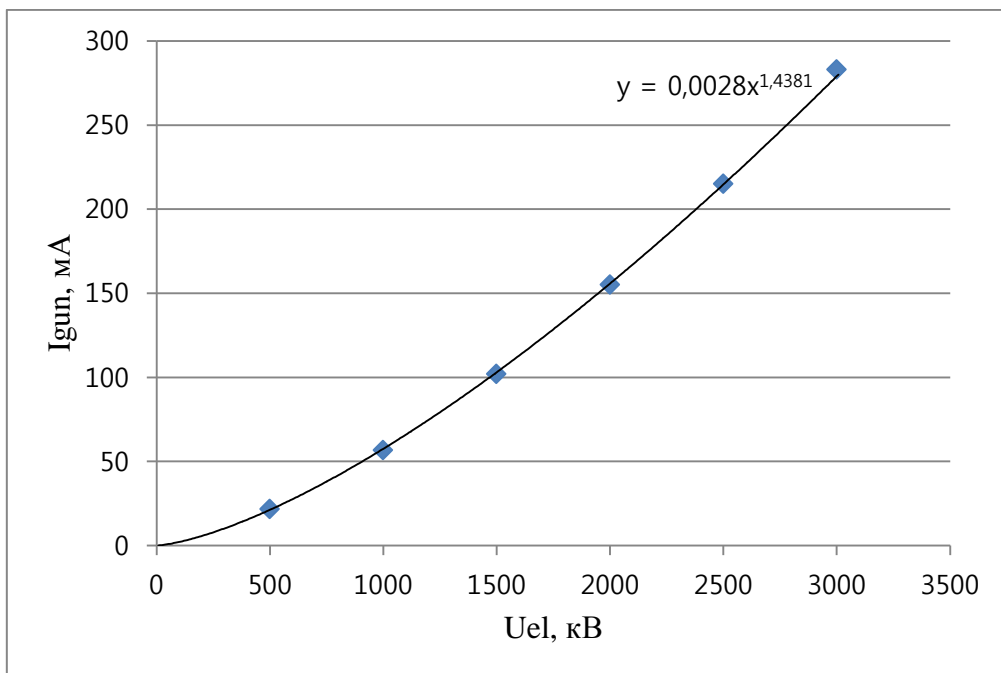


Рис. 26. Зависимость тока пушки от напряжения на управляющем электроде относительно катода.

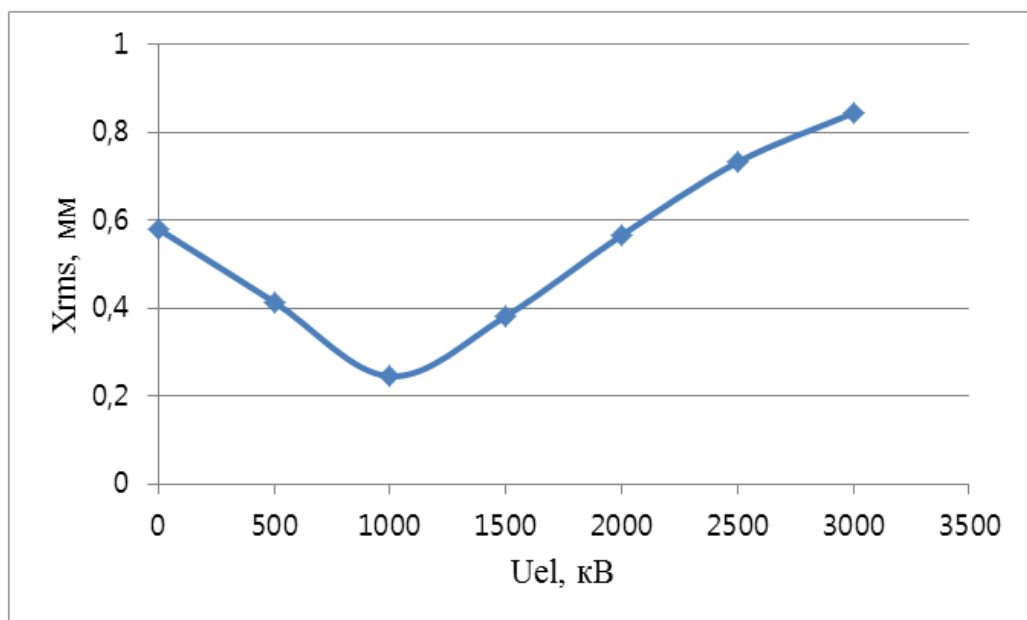


Рис. 27. Зависимость среднеквадратичного размера пучка от напряжения на управляющем электроде относительно катода.

На Рис. 28, 29 показаны траектории электронов при  $U_{el} = 1.5$  кВ и 0.5 кВ. При низком напряжении на управляющем электроде пучок

становится перефокусированным, что приведет к дополнительным потерям электронов пучка на стенках ускоряющей структуры и низкому коэффициенту захвата.

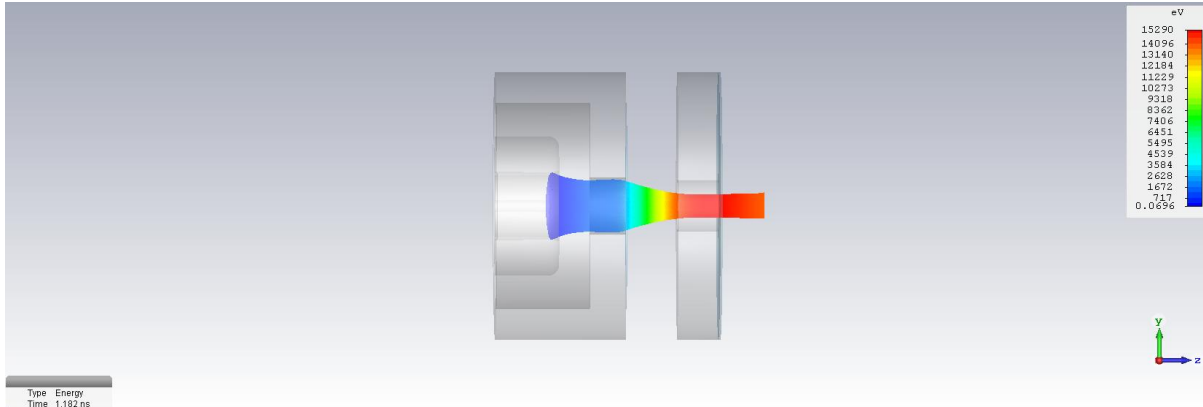


Рис. 28. Траектории электронов при напряжении на управляющем электроде относительно катода 1,5 кВ.

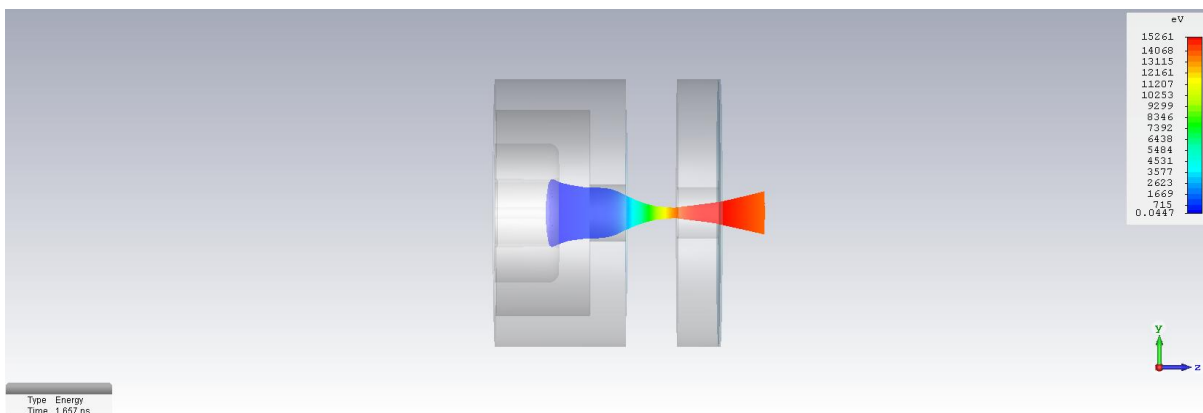


Рис. 29. Траектории электронов при напряжении на управляющем электроде относительно катода 0,5 кВ.

На Рис. 30 показаны фазовые портреты пучка на выходе электронной пушке в координатах  $(x, \beta_x)$ , где  $\beta_x = \frac{v_x}{c}$ ,  $v_x$  – проекция скорости электрона на ось  $x$  при напряжении на управляющем электроде относительно катода 0, 1,5 и 3 кВ.

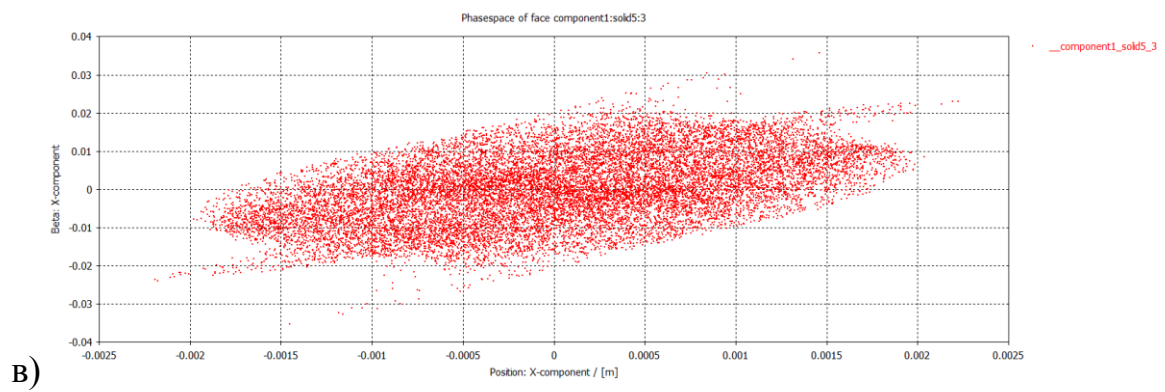
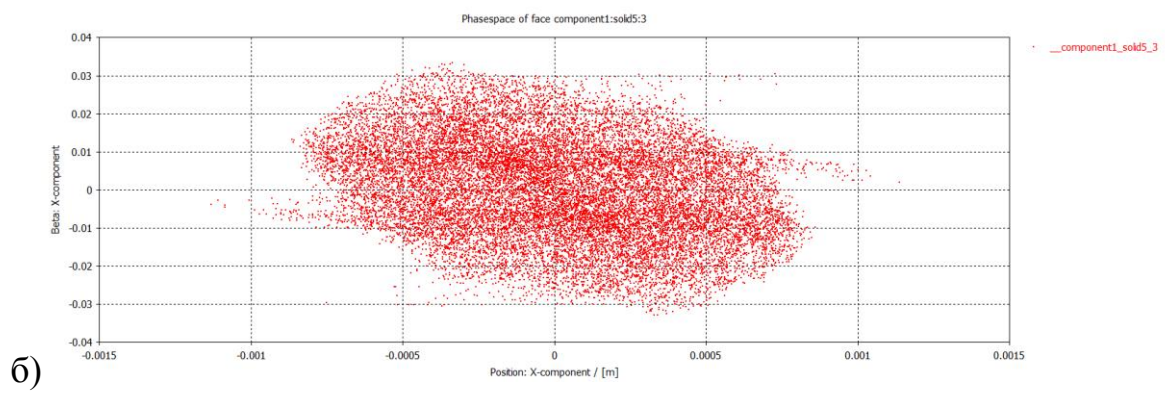
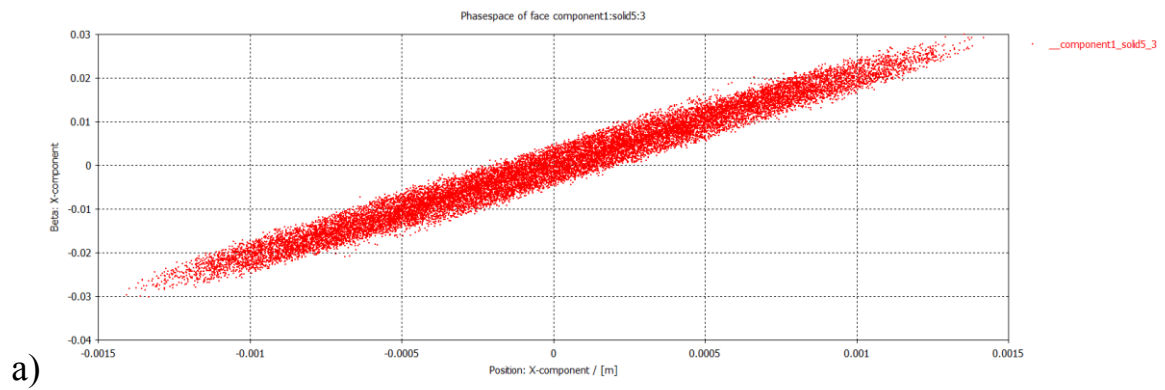


Рис. 30. Фазовые портреты пучка в координатах  $(x, \beta_x)$  при напряжении на управляющем электроде относительно катода а) 0, б) 1,5 кВ, в) 3 кВ.

## 2.8. Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре

Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре были проведены с помощью программы Parmela [10] для различных напряжений на управляющем электроде пушки относительно катода.

На Рис. 31, 32 показаны зависимости коэффициента захвата и суммарной мощности частиц пучка с энергией, большей 800 кэВ, на выходе ускорителя от тока пушки.

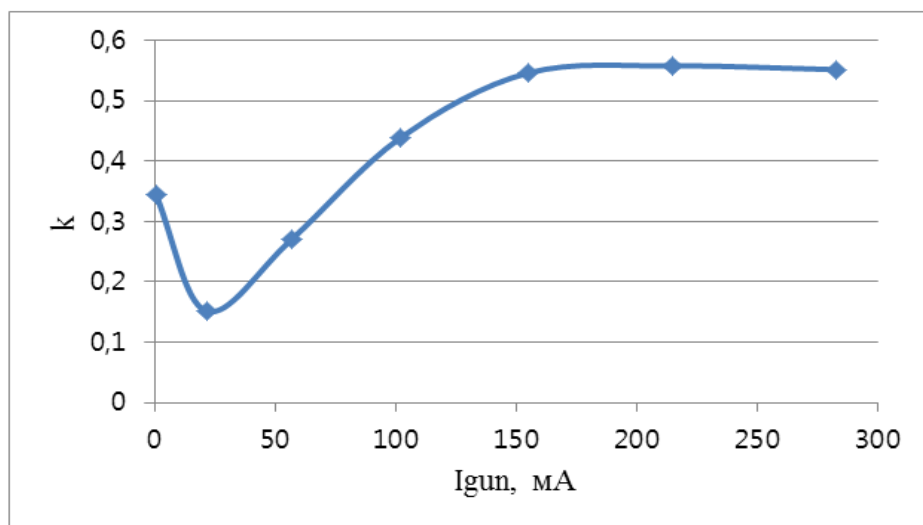


Рис. 31. Зависимость коэффициента захвата электронов в ускоряющей структуре от тока пушки.

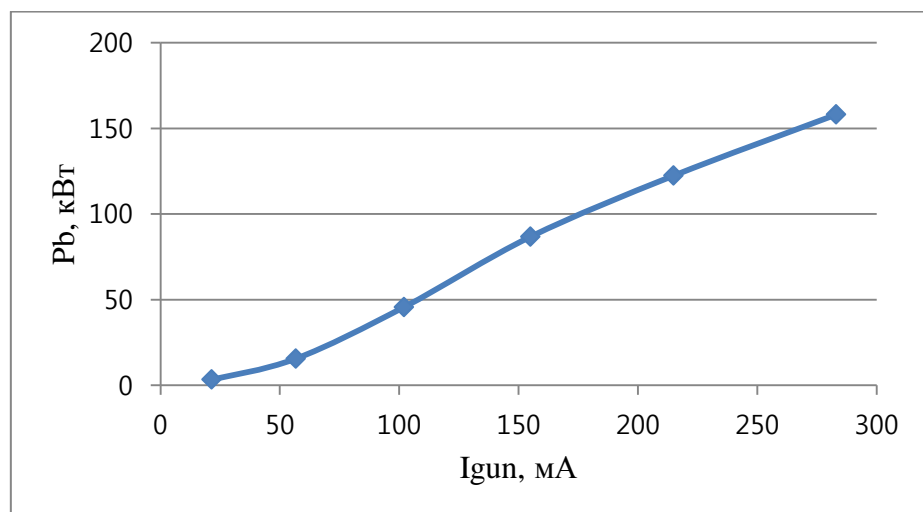


Рис. 32. Зависимость суммарной мощности частиц пучка с энергией, большей 800 кэВ, на выходе ускорителя от тока пушки.

Расчеты показали, что, начиная с тока пушки около 150 мА, коэффициент захвата остается почти постоянным ( $\approx 55\%$ ) в диапазоне проведенных расчетов. Для малых токов пушки ( $<150$  мА) уменьшение коэффициента захвата объясняется плохой сходимостью пучка на выходе из пушки из-за малых сил пространственного заряда.

Результаты с точки зрения динамики пучка в ускоряющей структуре хоть и немного не дотягивают до значений, на которые ориентировались в ходе оптимизации электронной пушки, все равно являются вполне удовлетворительными. Небольшим увеличением напряжения на управляющем электроде выше 3 кВ можно добиться достижения проектной мощности пучка 175 кВт при незначительном уменьшении коэффициента захвата.

Режимы с током пушки меньше 150 мА хоть и приводят к понижению коэффициента захвата, не сопровождаются большими потерями мощности пучка на стенках ускоряющей структуры, и, таким образом, вполне пригодны для работы ускорителя.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Ускорители частиц используются не только в фундаментальных науках (физика, биология, химия, исследования новых материалов), но и в промышленных областях (медицина, безопасность в аэропортах и т.д.) Около 20 000 ускорителей работают по всему миру. 10000 из них используются для промышленного применения. 900 промышленных ускорителей продаются ежегодно и формируют рынок на 50 триллионов долларов ежегодно. В диапазоне энергий электронного пучка 0,5-5 МэВ в промышленности доминируют ускорители прямого действия и



импульсные резонаторные ускорители. Ускорители непрерывного действия, могут составить им реальную конкуренцию. Имея меньший, чем у ускорителей прямого действия, КПД, они значительно выигрывают у них по габаритам, а также заметно превосходит по максимальной мощности пучка представленные на рынке импульсные резонаторные ускорители. Электронная пушка является неотъемлемой и важной частью ускорителя, во многом влияя на итоговую его производительность. В результате выполнения диссертационной работы была оптимизирована электронная пушка для нового проекта ускорителя непрерывного действия с максимальной мощностью пучка 175 кВт. Требуемые параметры были достигнуты, итоговые геометрические размеры приведены в Таблице 4 (названия параметров как на Рис. 20).

Параметр	Значение
$Z_f$ , мм	1,22
$\alpha$ , град.	105
$L_{c\ el}$ , мм	4,22
$L_{el}$ , мм	3,5
$L_{el\ a}$ , мм	5
$L_a$ , мм	4
$R_a$ , мм	2,5
$R_{el}$ , мм	2,8

Табл. 4. Геометрические размеры оптимизированной электронной пушки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Alimov, A. Chepurnov, O. Chubarov et al. CW linear accelerator with high beam current. Proceedings of LINAC-1994, Tsukuba, Japan. KEK, Tsukuba, Japan, 1994. P. 603-605.
2. A. Alimov, A. Chepurnov, O. Chubarov et al. Compact low energy cw linac with high beam current. Proceedings of PAC-1995, Dallas, TX. IEEE, New York, 1995. P. 1096-1098.
3. A.S. Alimov, D.I. Ermakov, B.S. Ishkhanov et al. A 1.2-MeV Two-Section Continuous Wave Linear Electron Accelerator with 50-mA Average Beam Current. Instruments Exp. Techniques. 2002. Vol. 45, № 5. P. 691–697.
4. D.S. Yurov, A.S. Alimov, B.S. Ishkhanov et al. Continuous-wave electron linear accelerators for industrial applications. Phys. Rev. AB. 2017. Vol. 20, 044702. P. 1-11.
5. Г. Пак, Д.С. Юров, Мощный ускоритель электронов непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ. Труды XX межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 2019. С. 74-78.
6. Stanley Humphries, Jr., Charged particle beams. John Wiley and Sons, 1990. P. 288.
7. <https://www.cst.com/>
8. (2007, October). CST Particle Studio, Features and Application Examples. Computer Simulation Technologies Available: <https://www.cst.com/Content/Events/UGM2007/04-Balk.pdf> (Last accessed on October 20, 2014).
9. (2014) CST Particle Studio. Computer Simulation Technologies. [Online]. Available: <https://www.cst.com/Products/CSTPS> (Last accessed on October 20, 2014).

10. J.H. Billen, L.M. Young, PARMELA, Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-96-1835 (1996).
11. M.Hoseinzade, A.Sadighzadeh, Design and numerical simulation of thermionic electron gun, Nuclear Science and Technology Research Institute Report(Iran, 2015)
12. Amitava Roy, Electronic Emission & Electron Guns, Proceedings of SPPT 2010, BARC(Mumbai, 2010)