

Электронная пушка для линейного ускорителя непрерывного действия

213М Пак Гитэ

Научный руководитель

Юров Дмитрий Сергеевич



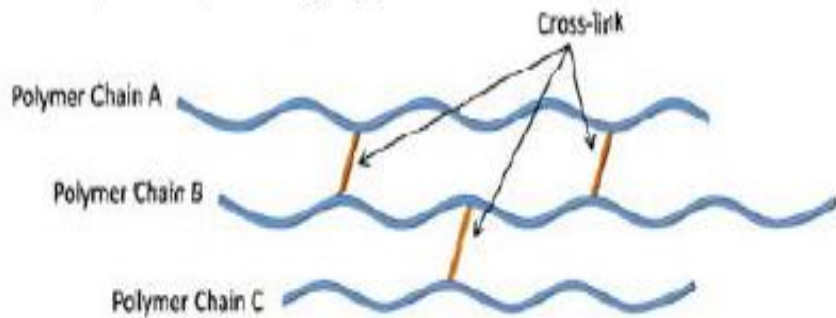
Оглавление

1. Введение
2. Теоретические основы
3. Оптимизация электронной пушки
4. Заключение
5. Литература



Введение

- 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.)
- Электронный ускоритель непрерывного действия с энергией 1МэВ и мощностью пучка 175кВт может использоваться в таких областях.



<Обработка полимеров>

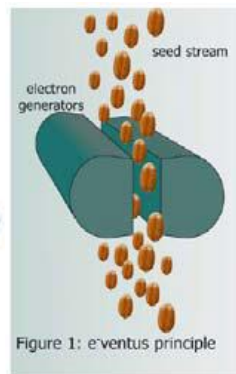


Figure 1: eVentus principle



Figure 2: seed granule

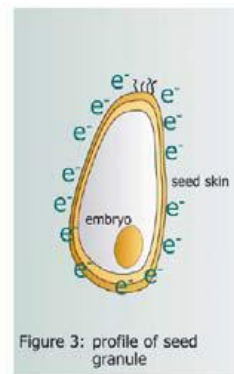
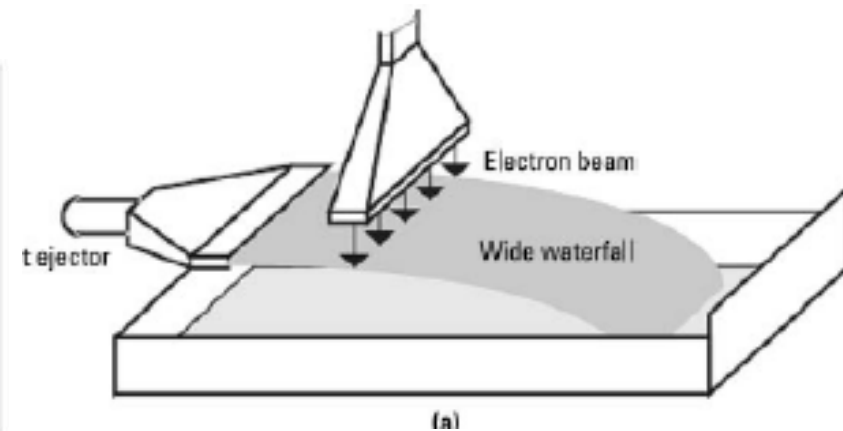
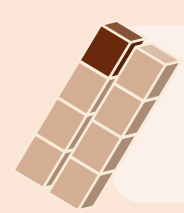


Figure 3: profile of seed granule

<Стерилизация>



<Обработка сточных вод и дымовых газов>



Введение

- В прошлом году был разработан проект ускорителя электронов непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью 175 кВт.
- Новый проект ускорителя и параметры:

Энергия пучка	1,02±0,05 МэВ
Максимальная мощность ускоренного пучка	175 кВт
Рабочая частота	2450 МГц
Коэффициент захвата	~ 60%
Выходная мощность клистрона	200 кВт
Мощность СВЧ потерь в стенках ускоряющей структуры	24,1 кВт
Электронный КПД	87,5%
Полный КПД	~40%



Введение

- При энергии ускоренного пучка 1 МэВ и мощности 175 кВт, ток пучка на выходе ускорителя должен составлять 175 мА.
- При обеспечении нужных параметров пучка на входе в ускоряющую структуру, коэффициент захвата будет составлять около 60%.
При коэффициенте захвата 60% ток пушки должен быть 290 мА.
- Цель работы : Получить результаты оптимизации электронной пушки с током 290 мА и обеспечить сходящийся пучок электронов с энергией 15.5 кэВ на входе в ускоряющую структуру.



Теоретические основы

- Электронная пушка - это устройство, с помощью которого получают пучок электронов с заданной кинетической энергией и заданной конфигурации.
- Электронные пушки могут разделить по способу генерации электронов.

Термоэмиссия

- Электроны испускаются нагревом катода (~1000°C)
- Длительный срок службы
- Низкая скважность
- Присутствие нагревателя

Фотоэмиссия

- Электроны испускаются импульсом мощного лазерного излучения
- Большая яркость пучка
- Невозможность работы с большими плотностями тока при низкой скважности

Автоэмиссия

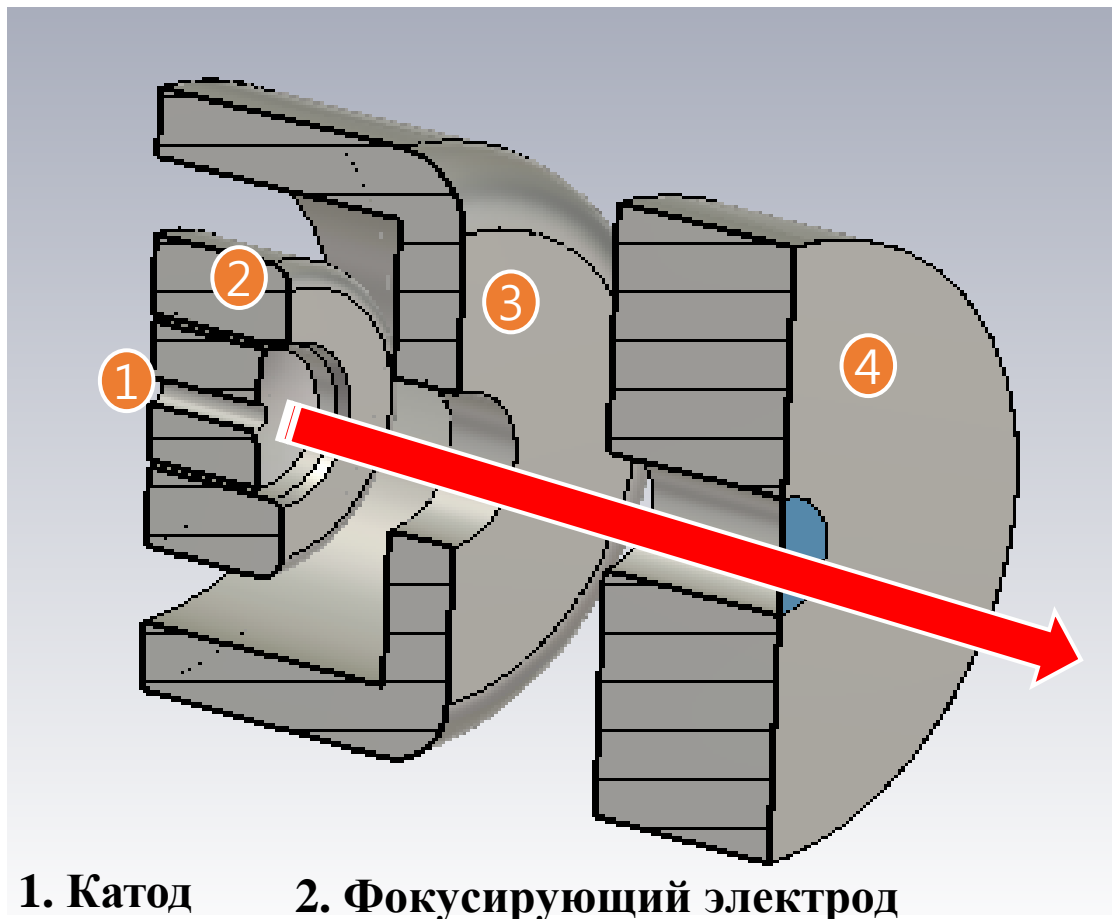
- Электроны испускаются сильным электрическим полем
- Достижима плотность тока свыше 1000 А/см²
- Импульсные устройства

- Для промышленных ускорителей частиц электронные пушки требуют высокой надежности и должны постоянно работать.



Теоретические основы

< Принцип работы электронной пушки с термоэмиссией >



1. Катод 2. Фокусирующий электрод

3. Управляющий электрод 4. Анод

- Принцип работы
 - ① При нагревании катода (более 1000°C) электроны испускаются с катода.
 - ② Электроны ускоряются в постоянном электрическом поле .
 - ③ Электроны проходят через анод и входят в ускоряющую структуру.
- Фокусирующий электрод влияет на сходимость пучка вблизи катода.
- Управляющий электрод регулирует ток пушки.



Теоретические основы

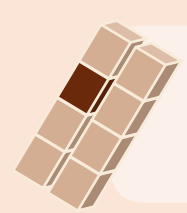
< Принцип работы электронной пушки с термоэмиссией >

- Максимальная плотность тока эмиссии термокатода может быть рассчитана с использованием закона Ричардсона Дешмана.

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

A : константа Ричардсона ($120 \text{ A} / \text{cm}^2\text{K}$); T : температура катода; k : постоянная Больцмана
 φ : работа выхода катода

- В реальности поток электронов формирует пространственный заряд, который изменяет распределение потенциала в электронной пушке.
- При росте тока эмиссии электрическое поле вблизи катода падает, в итоге препятствуя дальнейшему увеличению тока.



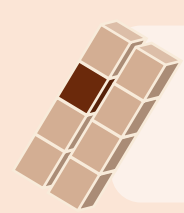
Теоретические основы

< Принцип работы электронной пушки с термоэмиссией >

- Ток эмиссии в таком режиме определяется только геометрией пушки и значениями потенциалов электродов. Это называется током в режиме ограничения пространственным зарядом.
- На практике электронные пушки работают в режиме ограничения пространственным зарядом для стабильности тока эмиссии.
- Плотность тока электронной эмиссии может быть рассчитана по закону Ленгмюра.

$$j_{sc} = gU^{3/2}$$

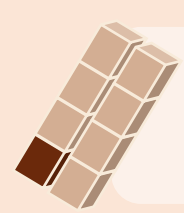
где g – постоянная для данной геометрии, называемая первеанс.



Теоретические основы

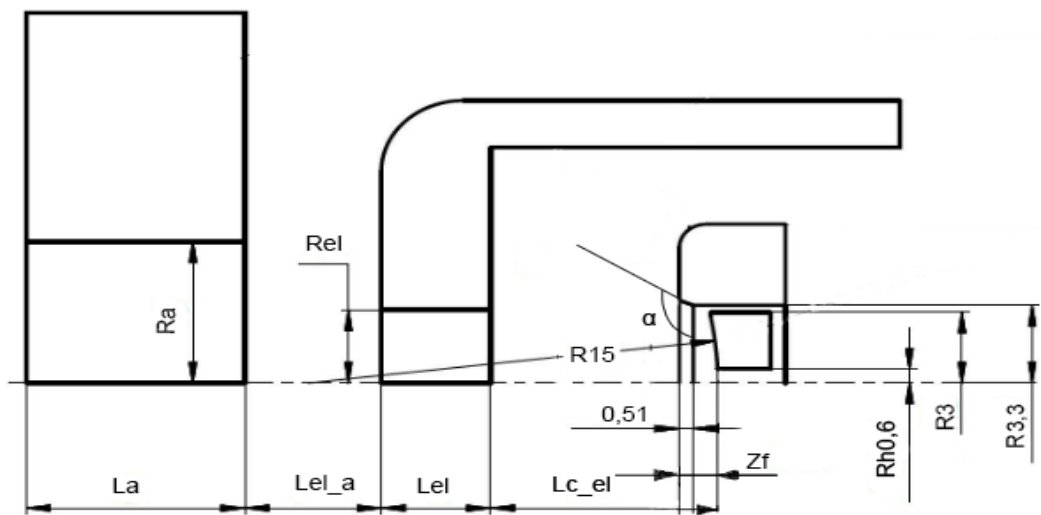
< Расчет электронной пушки в CST Studio >

- Разработка и оптимизация электронной пушки проводились с использованием пакета программ CST Studio.
- Модуль E-static Solver(ES) - находит значение электростатических полей в каждой ячейке сетки.
- Модуль Particle Tracking Solver (PTS) - проводит интегрирование уравнений движения частиц в рассчитанных полях с учетом пространственного заряда.



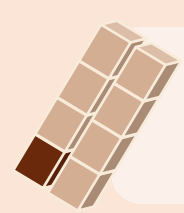
Оптимизация электронной пушки

< Начальные и измененные параметры >



Параметры	Значение
Потенциал катода и фокусирующего электрода	-15.5 кВ
Потенциал анода	0 кВ
Температура катода	1200 °С
Работа выхода	1,8 эВ

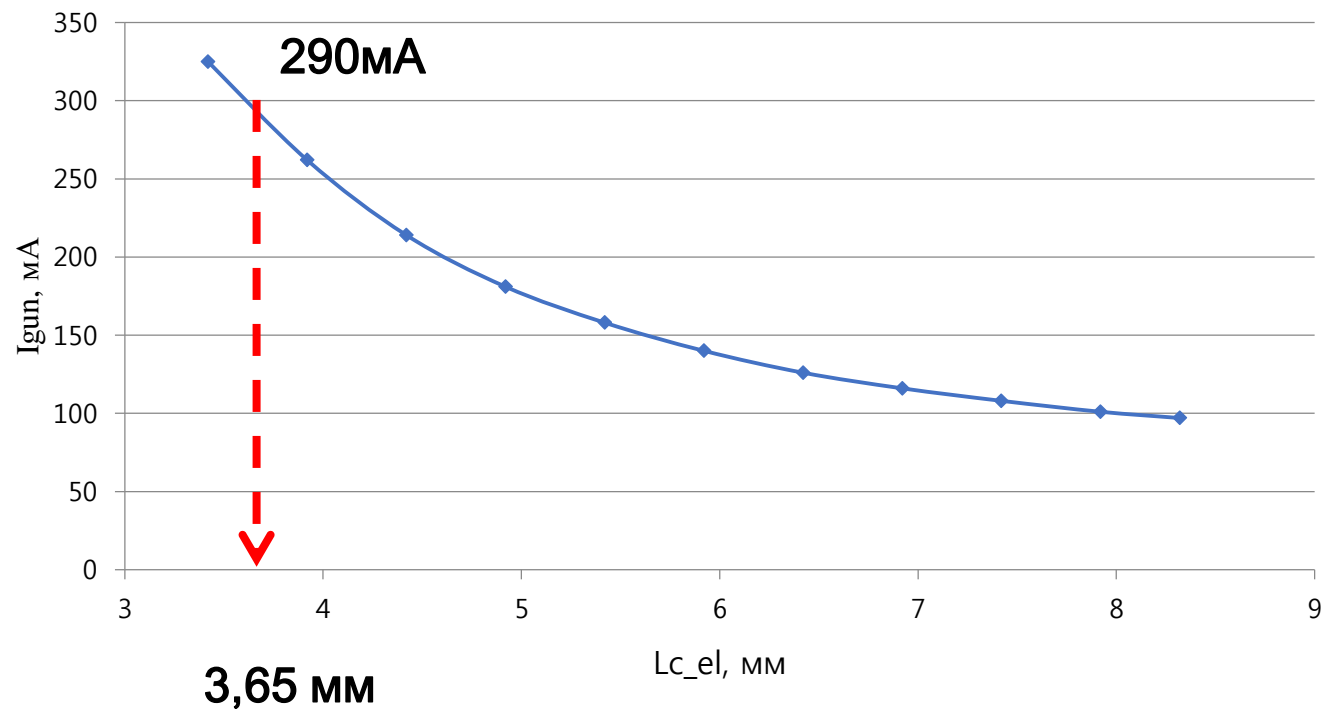
Параметры	Значение
Расстояние между катодом и управляющим электродом ($L_{e_{el}}$)	8,32 ~ 3,42 мм
Напряжения между управляющим электродом и катодом	0 ~ 3 кВ
Радиус анода (R_a)	2,5 ~ 6 мм
Радиус управляющего электрода (R_{el})	2,8 ~ 3,1 мм
Расстояние между управляющим электродом и анодом (L_{el_a})	4 ~ 10 мм
Длина управляющего электрода (L_{el})	1,5 ~ 4 мм
Длина анода (L_a)	4 ~ 8 мм
Фокусирующий электрод (Z_f, α)	Положение и угол

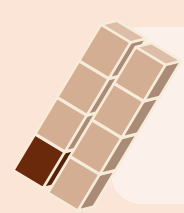


Оптимизация электронной пушки

1. Оптимизация расстояния между катодом и управляющим электродом

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

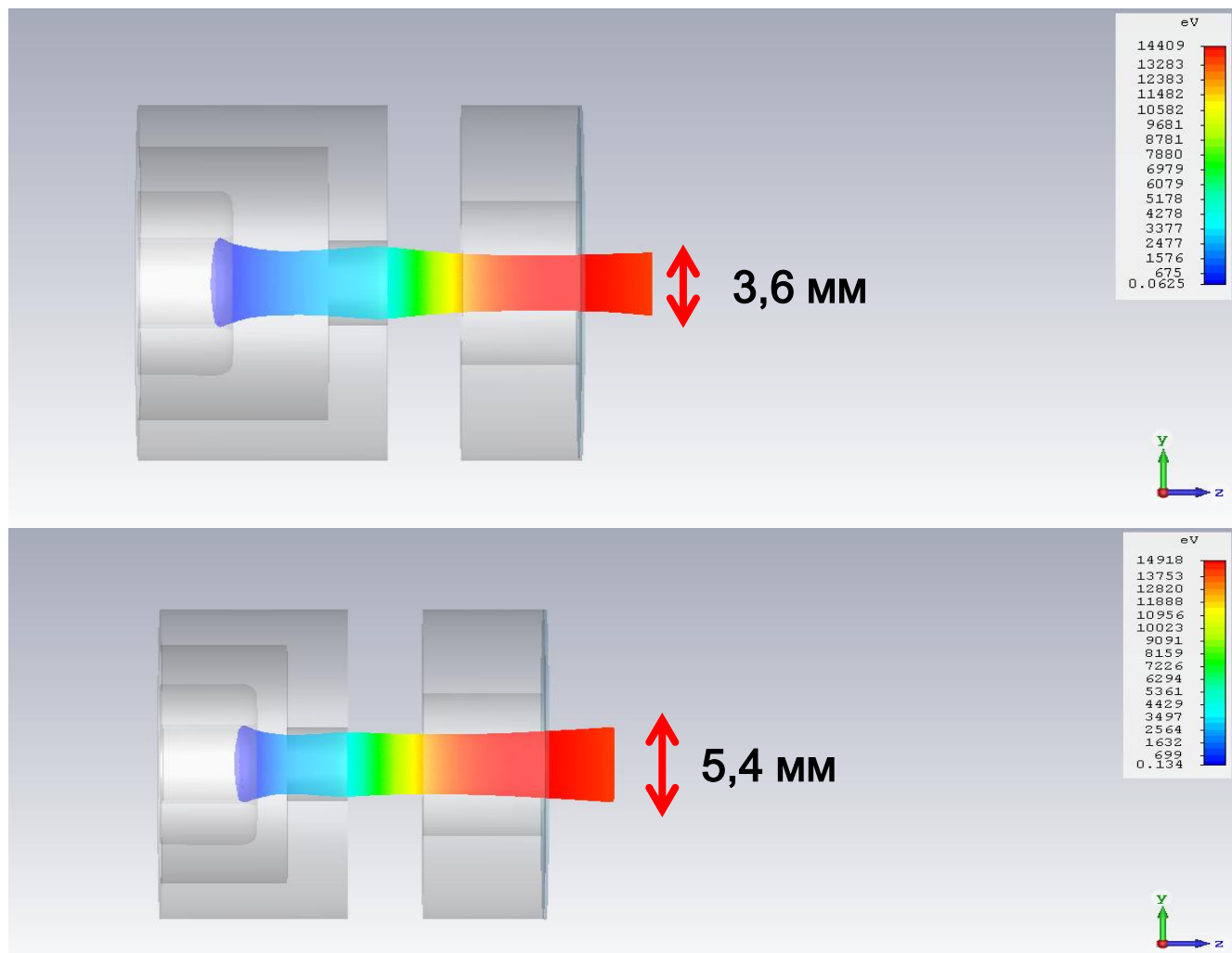


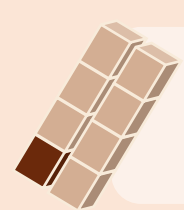


Оптимизация электронной пушки

1. Оптимизация расстояния между катодом и управляющим электродом

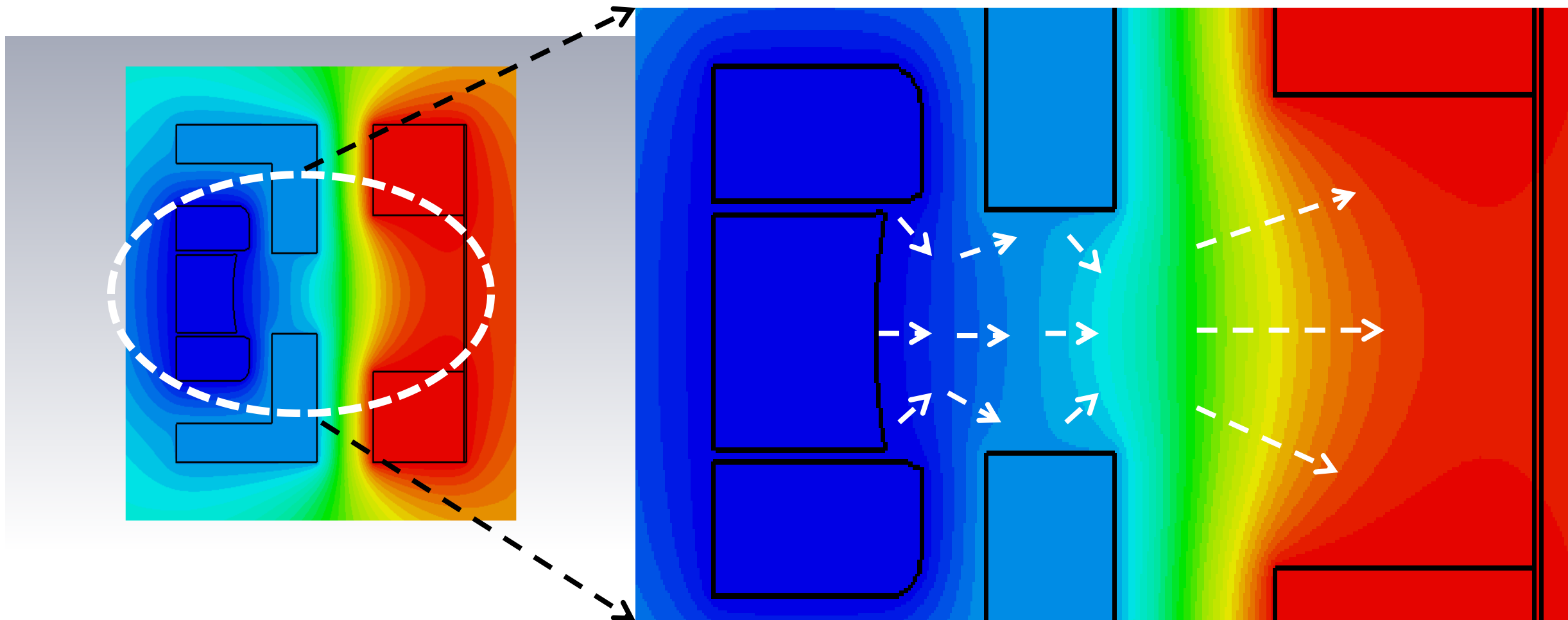
L_{c_el} , мм	I_{gun} , мА	d , мм
8,32	97	3,6
7,92	101	4,0
7,42	108	3,8
6,92	116	3,8
6,42	126	4,0
5,92	140	4,0
5,42	158	4,2
4,92	181	4,4
4,42	214	4,6
3,92	262	5,0
3,42	325	5,4



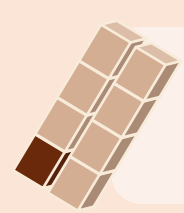


Оптимизация электронной пушки

1. Оптимизация расстояния между катодом и управляющим электродом

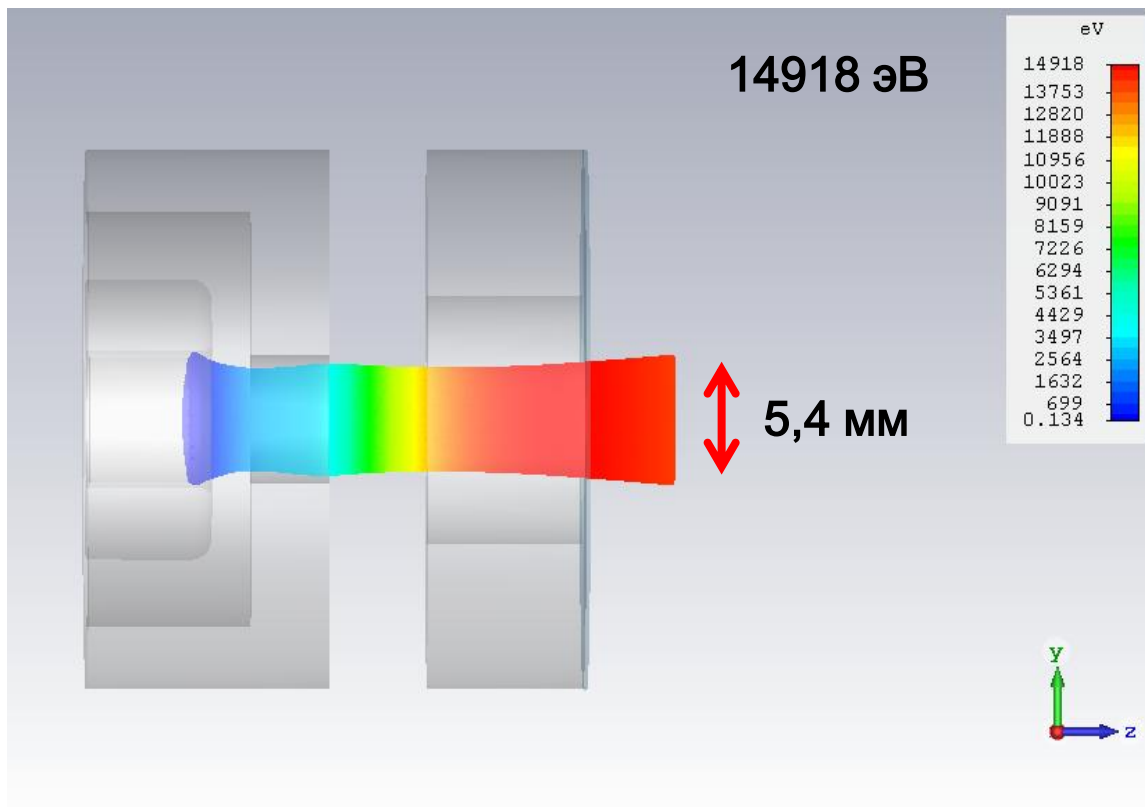


< Распределение электростатического потенциала в пространстве пушки >

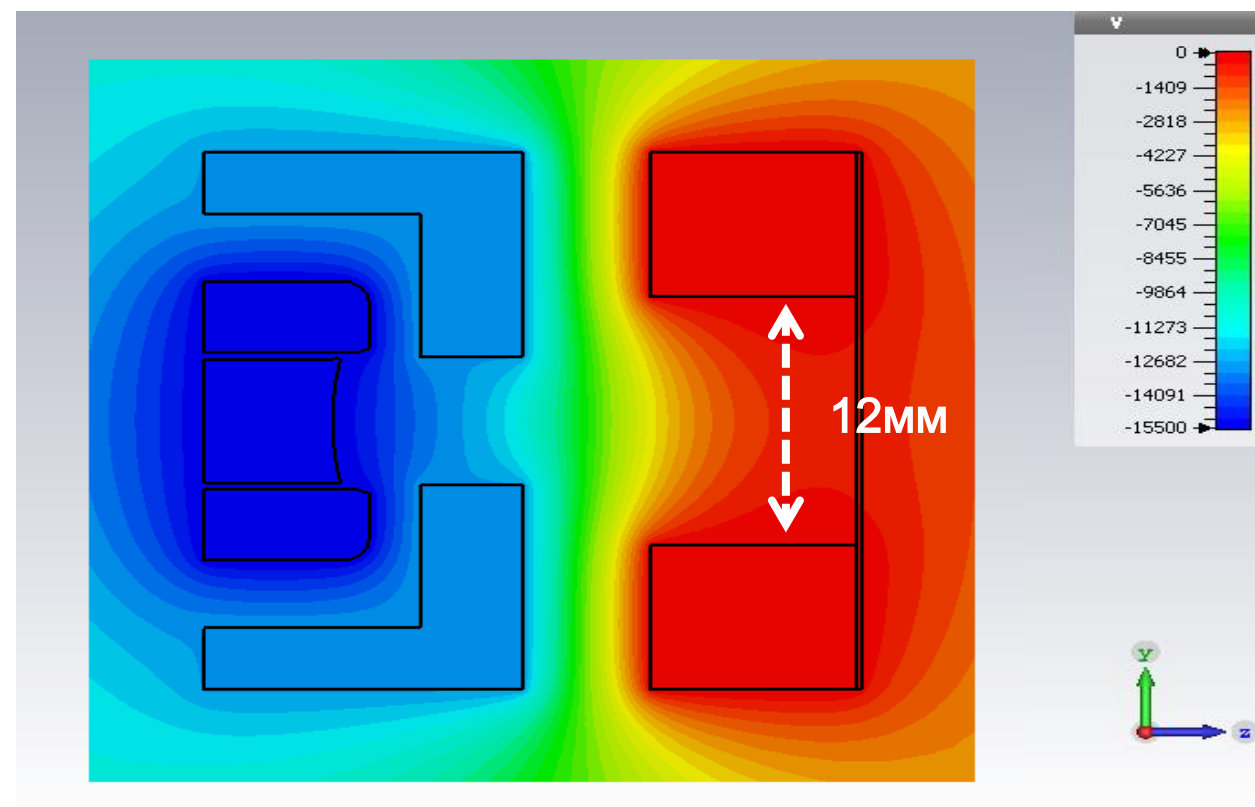


Оптимизация электронной пушки

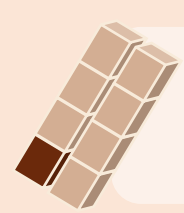
2. Влияние радиуса пролетного отверстия анода на параметры пучка



< Траектории электронов при $L_{c_el} = 3,42$ мм >

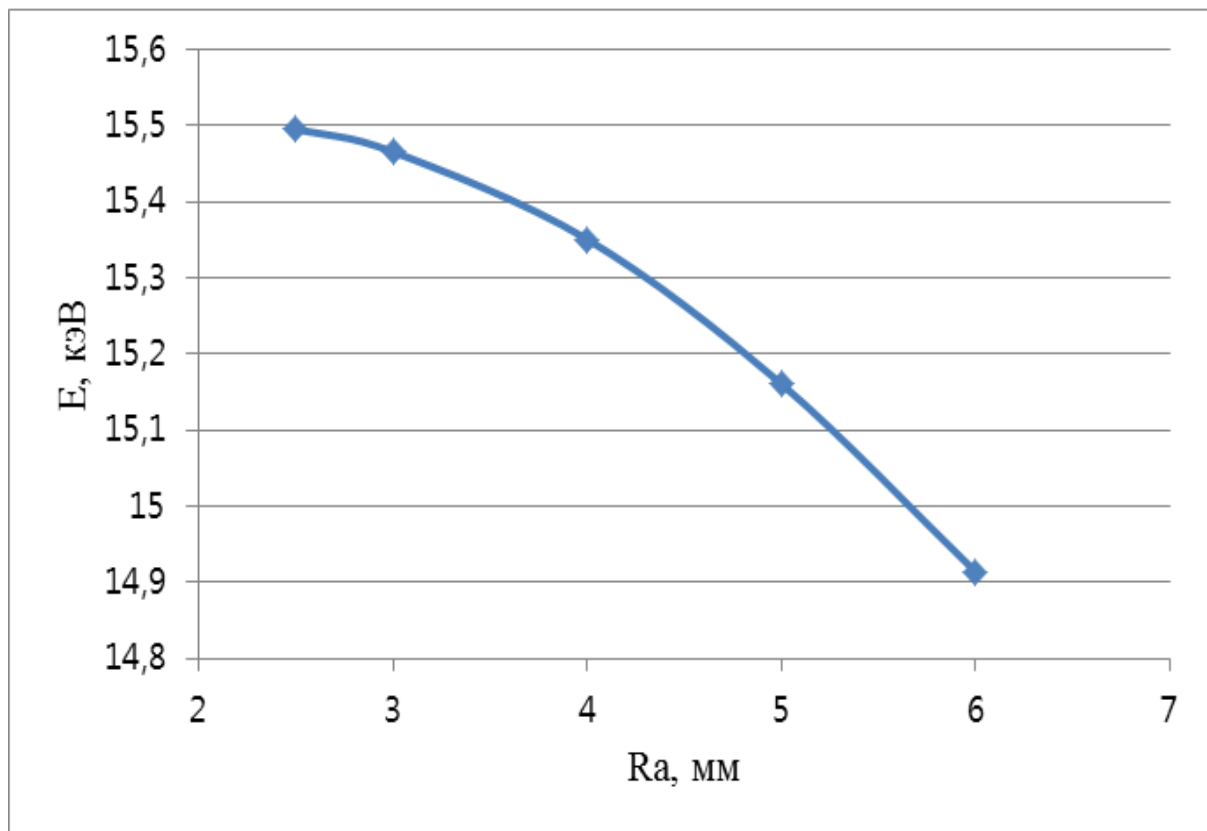


< Распределение электростатического потенциала в пространстве пушки >

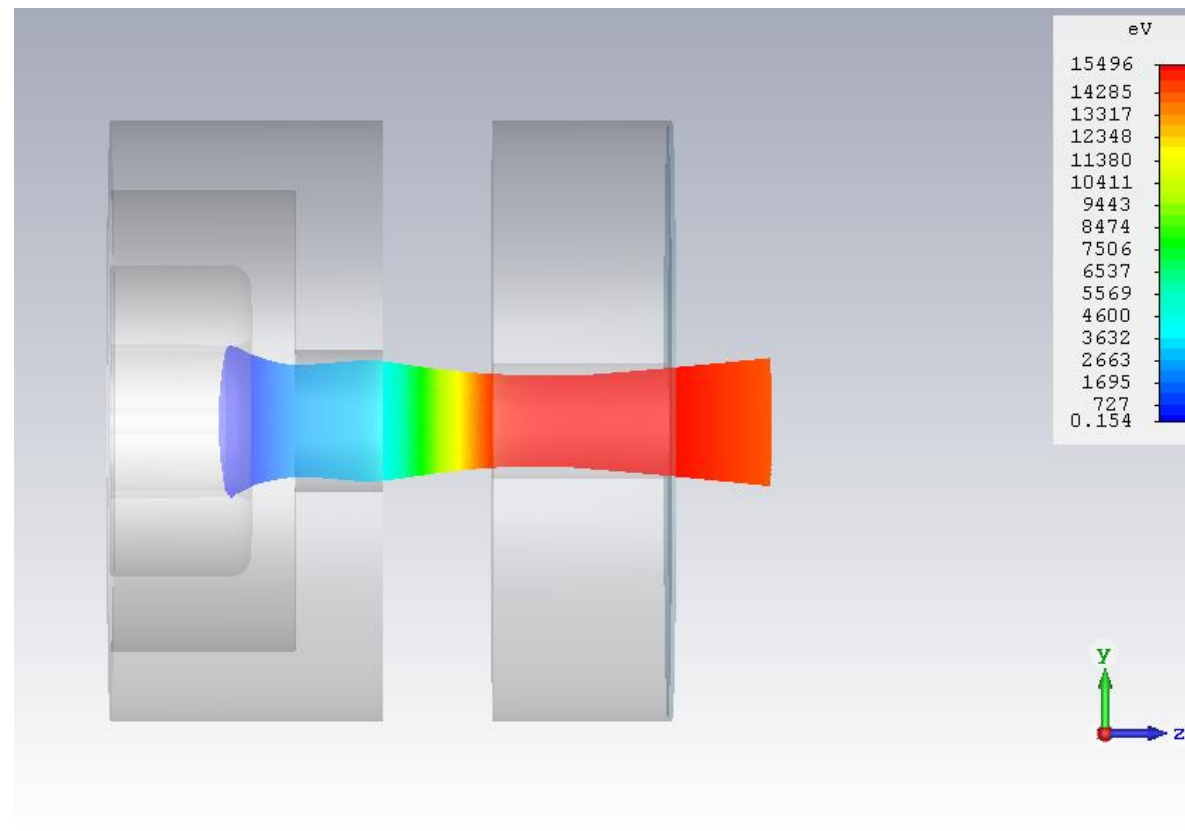


Оптимизация электронной пушки

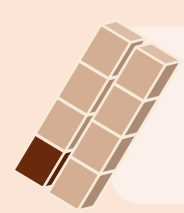
2. Влияние радиуса пролетного отверстия анода на параметры пучка



<Зависимость энергии электронов на выходе пушки от радиуса анода>

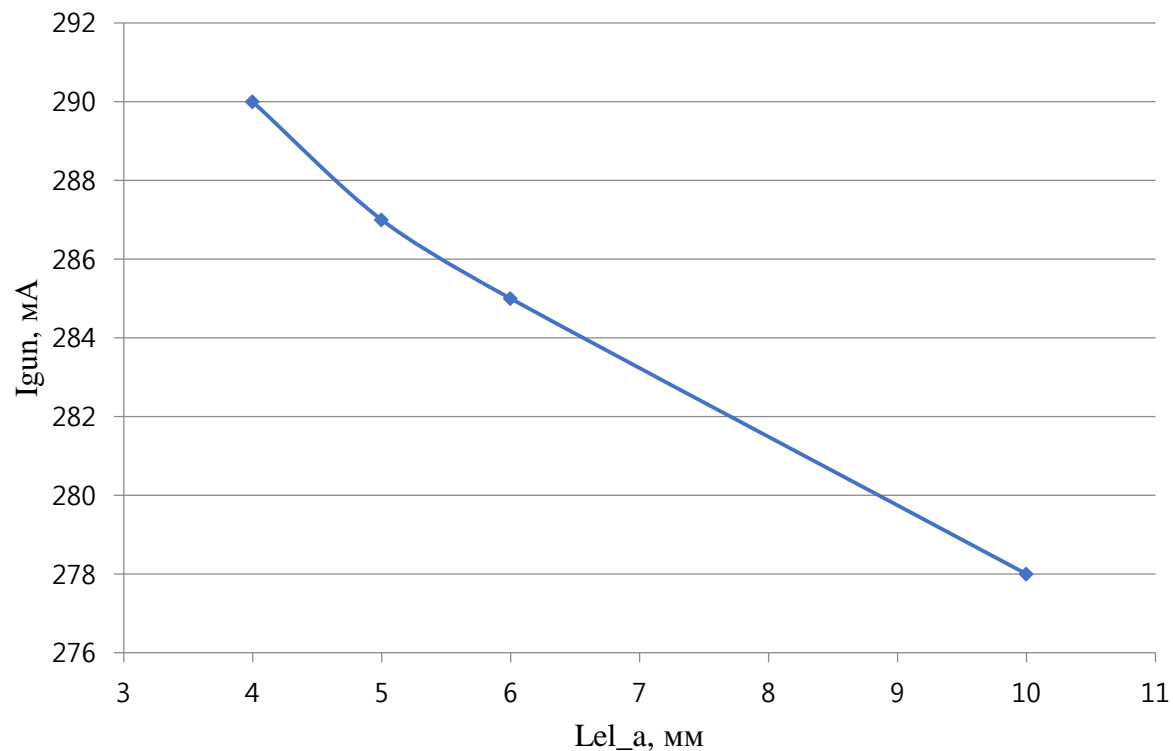


<Траектории электронов при $R_a = 2,5$ мм.>

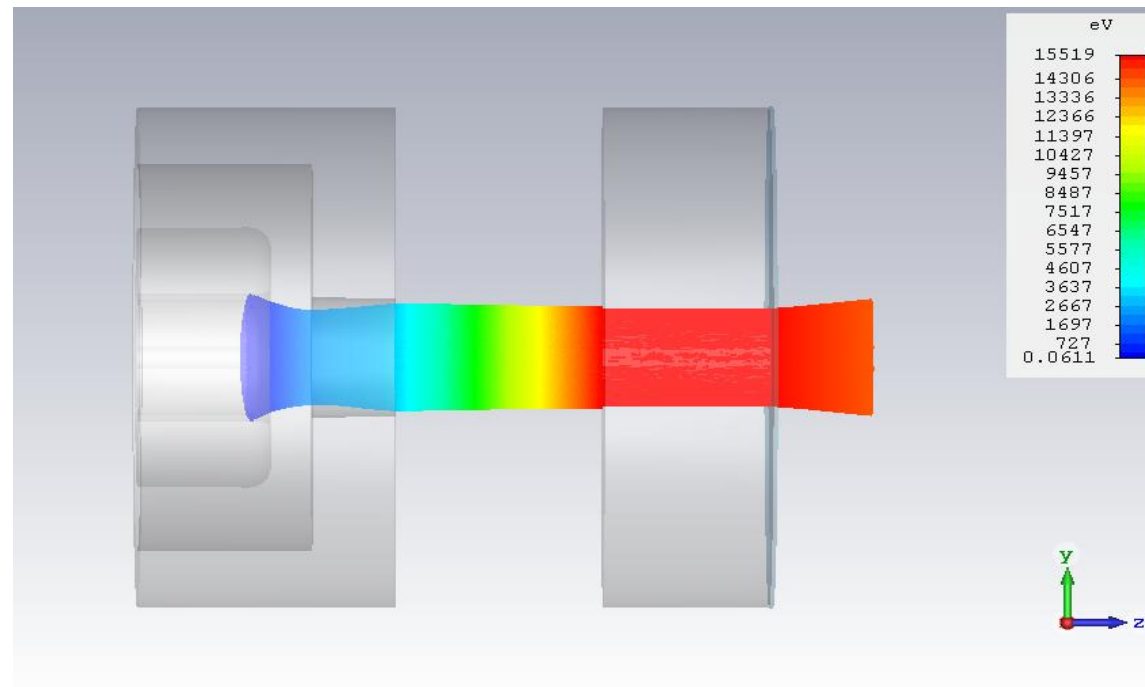


Оптимизация электронной пушки

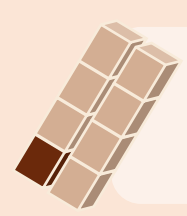
3. Оптимизация расстояния между управляющим электродом и анодом



<Зависимость тока пушки от расстояния между управляющим электродом и анодом>

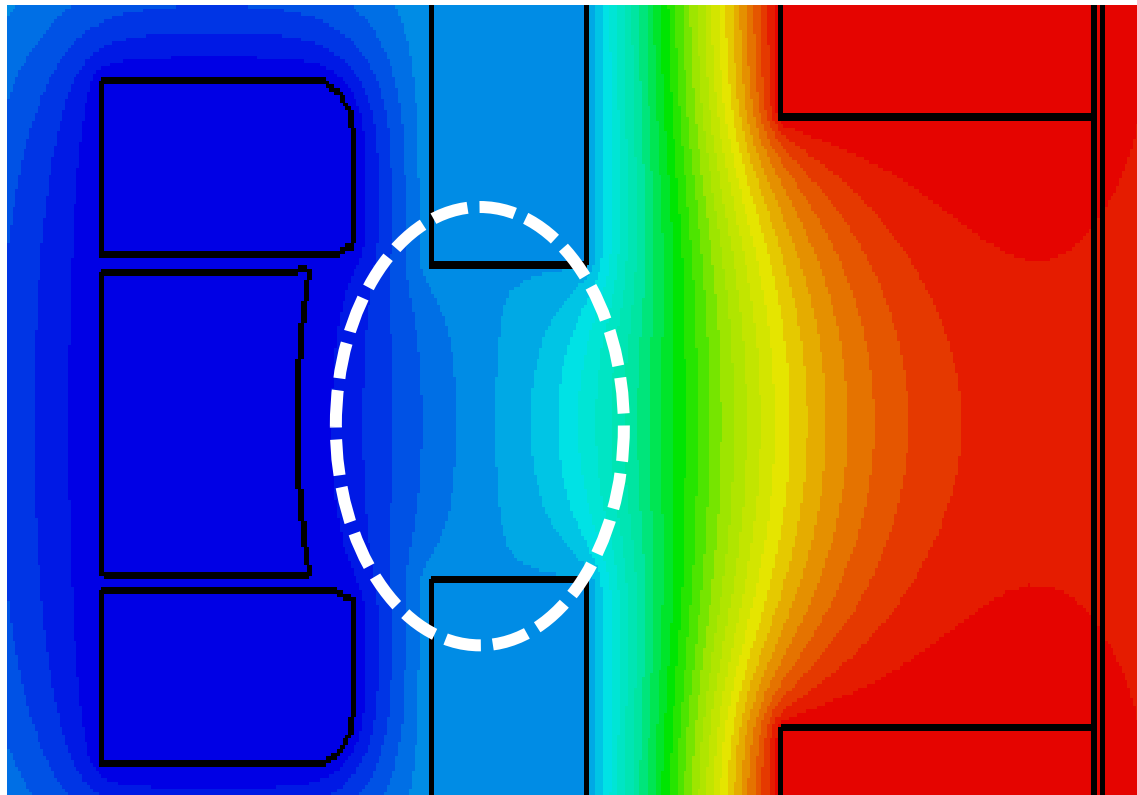


<Траектории электронов при $L_{el_a} = 10$ мм>

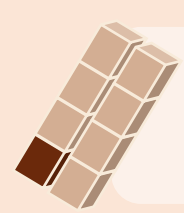


Оптимизация электронной пушки

4. Оптимизация длины управляющего электрода

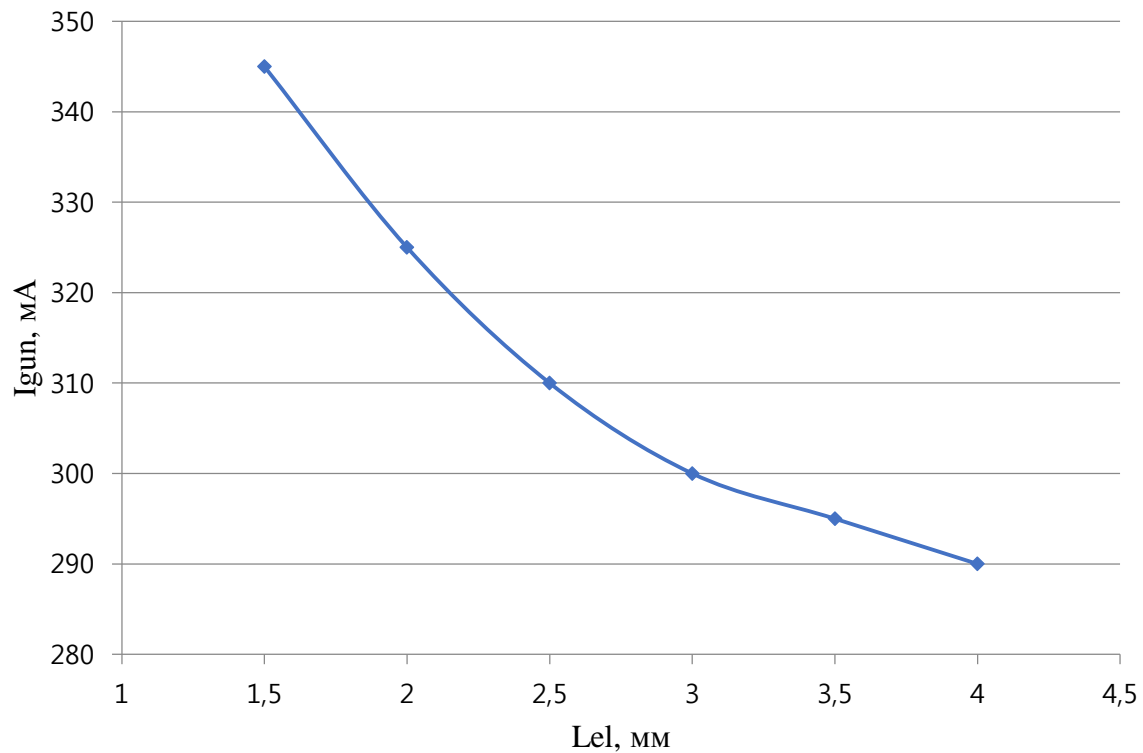


- Ближний к катоду край управляющего электрода формирует рассеивающую линзу.
- Видно, что длина управляющего электрода влияет на сходимость электронного пучка.

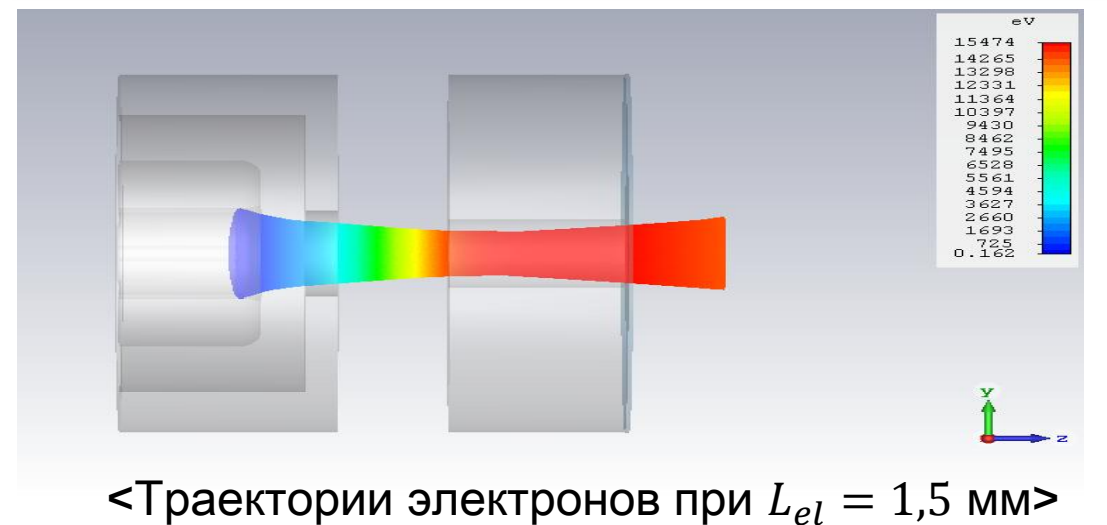
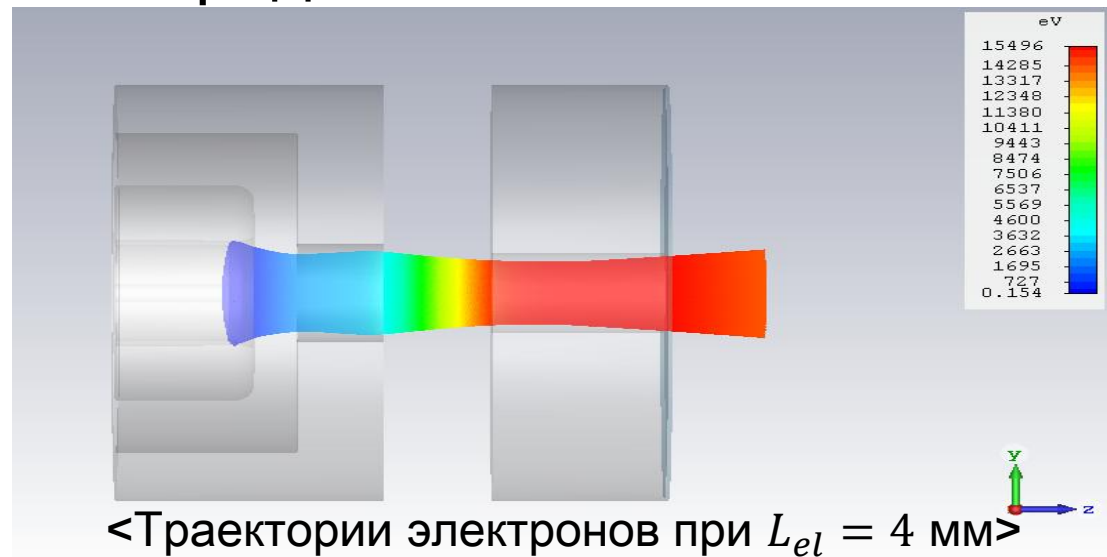


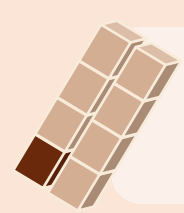
Оптимизация электронной пушки

4. Оптимизация длины управляющего электрода



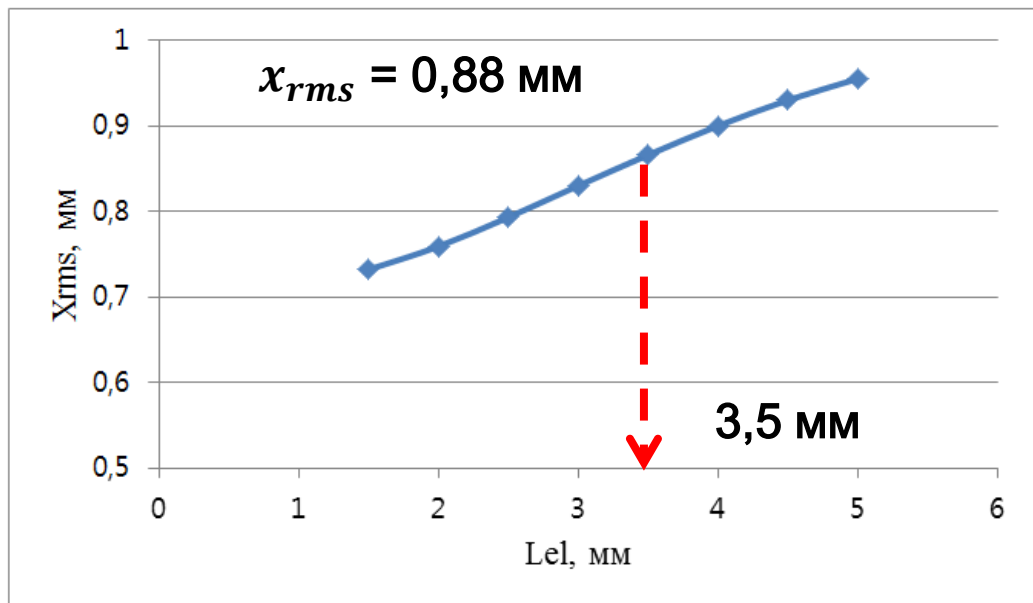
<Зависимость тока пушки от длины управляющего электрода>



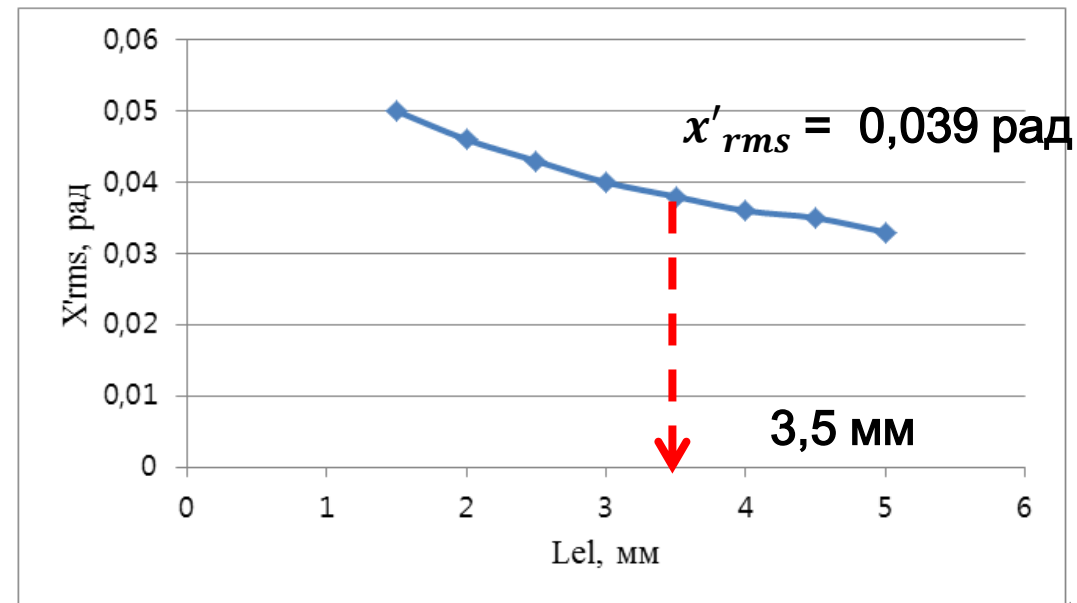


Оптимизация электронной пушки

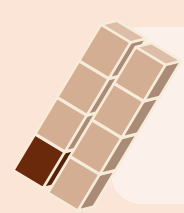
4. Оптимизация длины управляющего электрода



< Зависимость среднеквадратичного поперечного размера пучка на выходе электронной пушки от длины управляющего электрода >

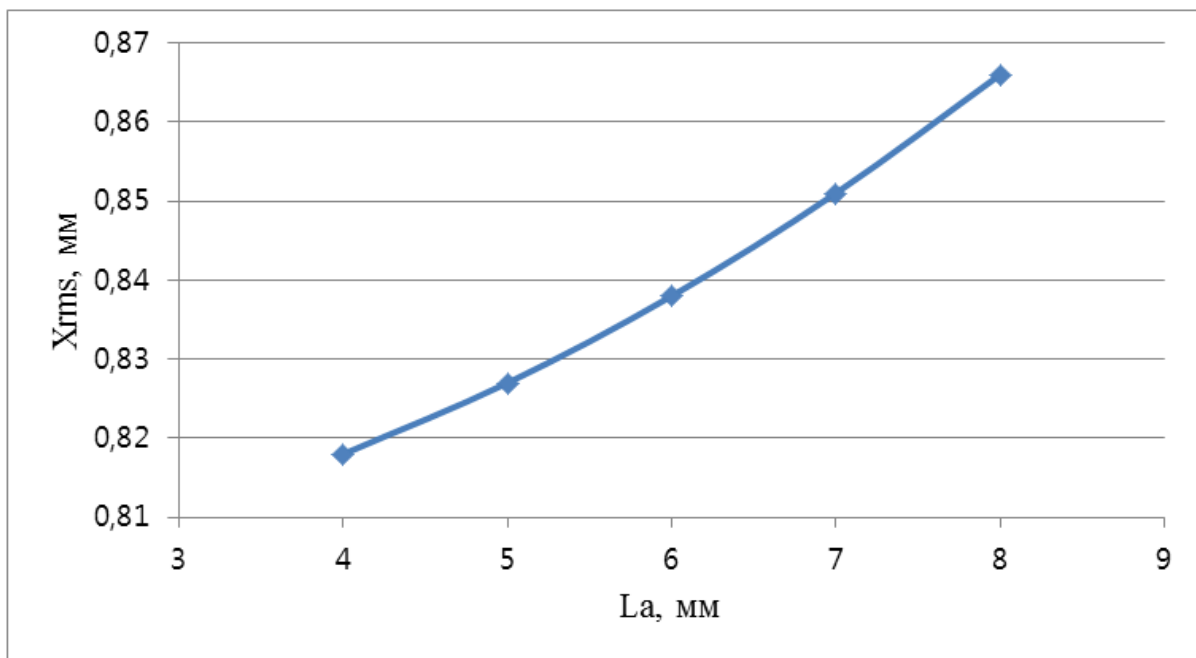


< Зависимость среднеквадратичного поперечного угла пучка на выходе электронной пушки от длины управляющего электрода >

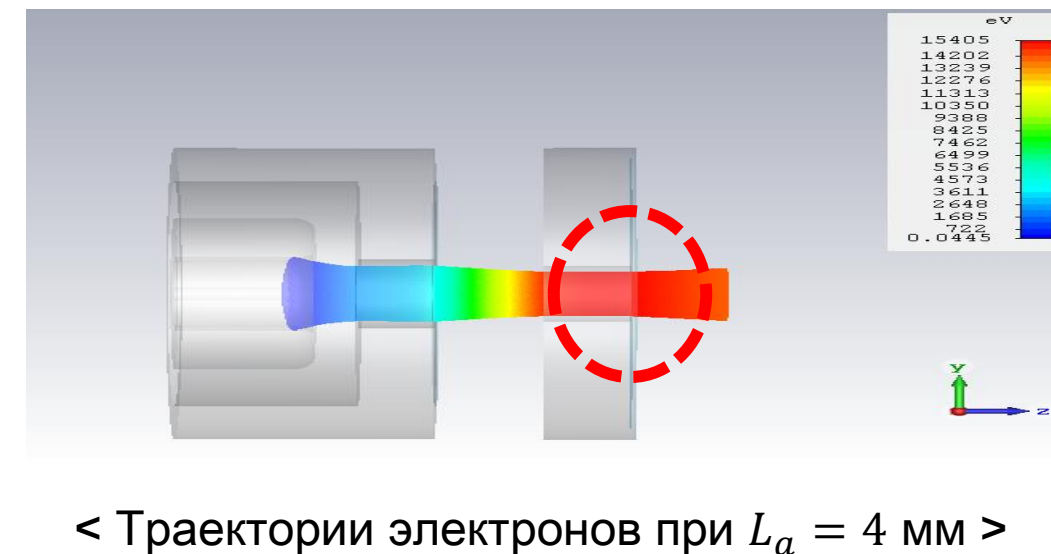
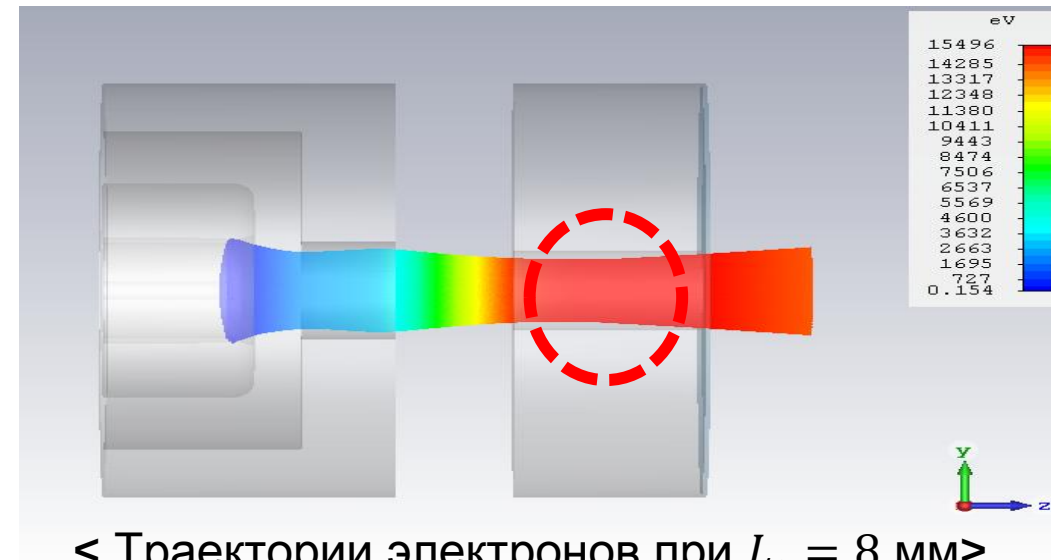


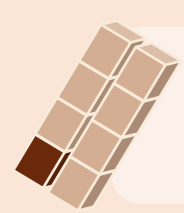
Оптимизация электронной пушки

5. Оптимизация длины анода



< Зависимость среднеквадратичного поперечного размера пучка на выходе электронной пушки от длины анода >

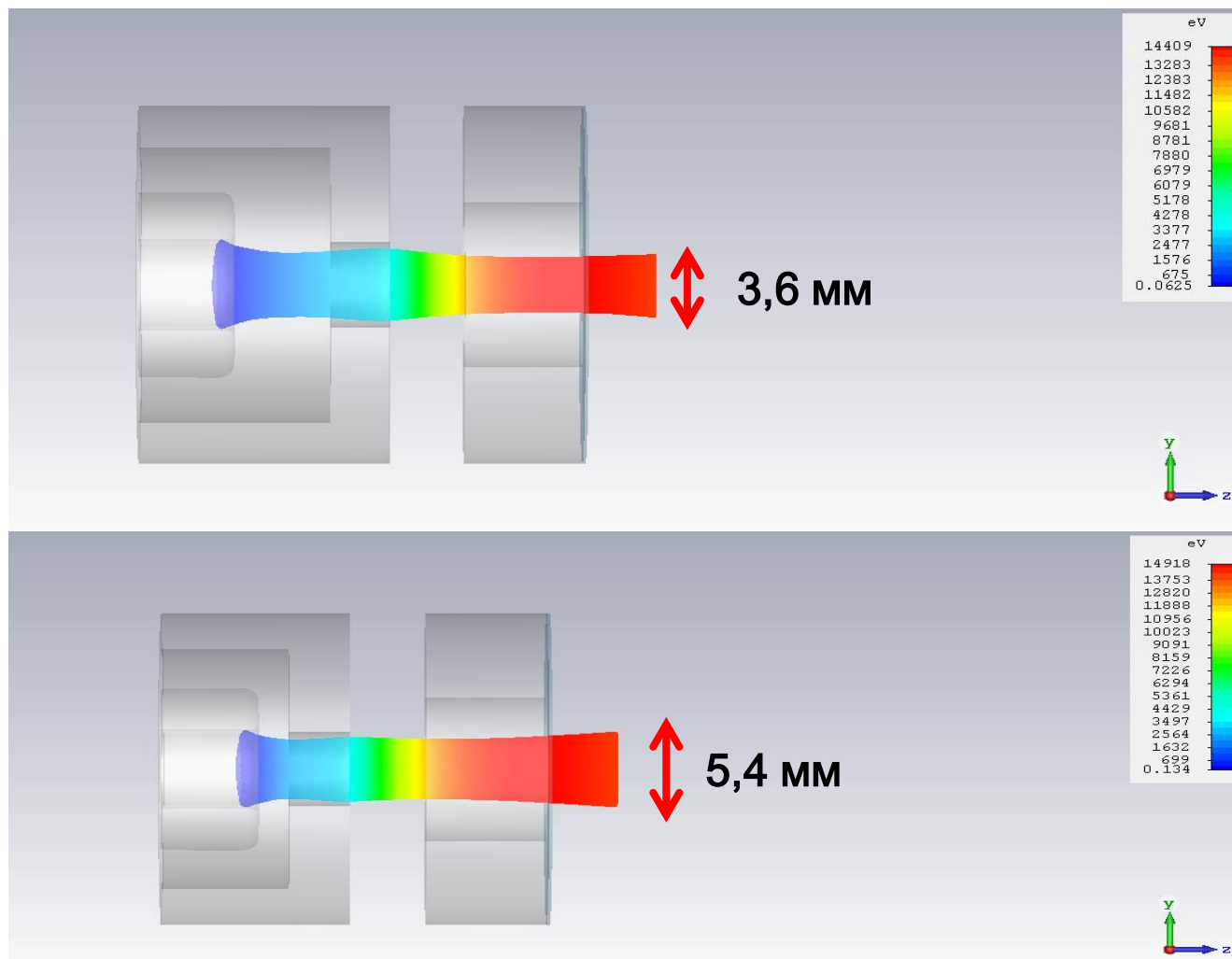


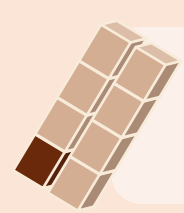


Оптимизация электронной пушки

6. Оптимизация фокусирующего электрода

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



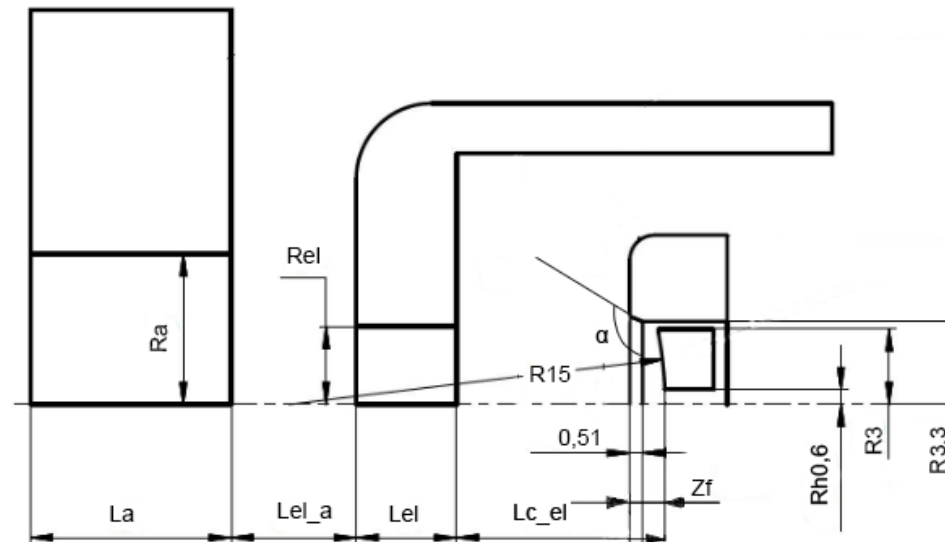


Оптимизация электронной пушки

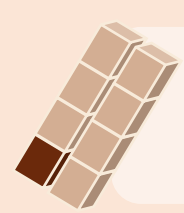
6. Оптимизация фокусирующего электрода

№	$L_{c_el}, \text{мм}$	$Z_f, \text{мм}$	$\alpha, \text{град.}$	$X_{rms}, \text{мм}$	$X'_{rms}, \text{рад}$	$I_{gun}, \text{мА}$	$\epsilon_{rms}, \text{мм}^* \text{мрад}$
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	1,42	112	0,816	0,0361	278	28,15
4	3,92	1,22 ²	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 ³	0,844	0,0327	283	26,85

< Оптимизация сходимости пучка >

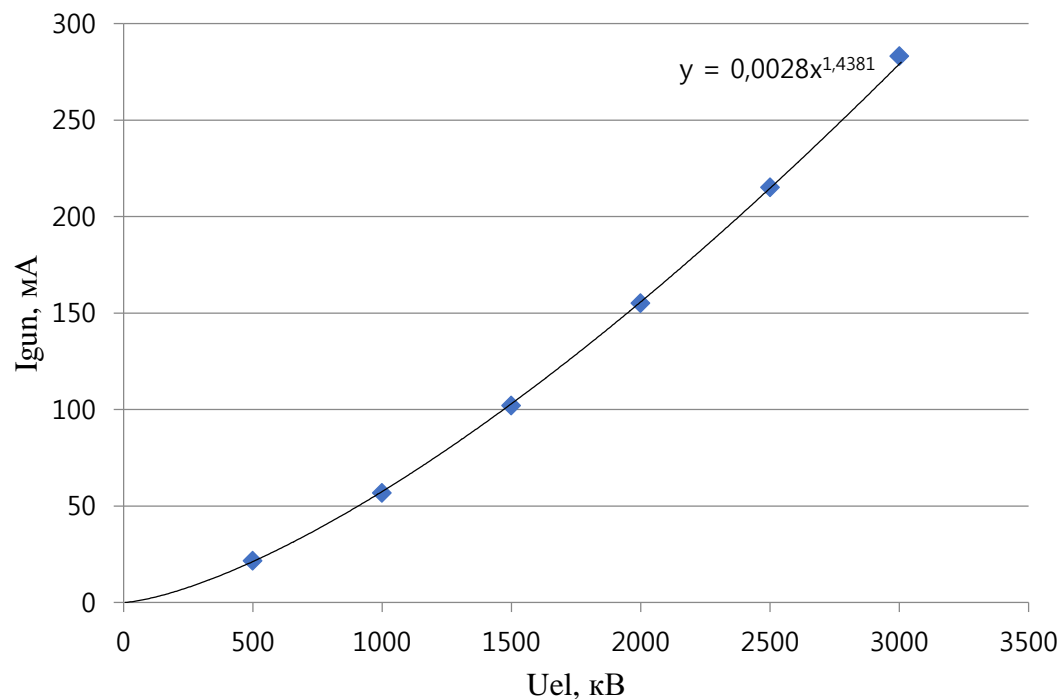


< Неизменные размеры пушки и обозначения изменяемых размеров >

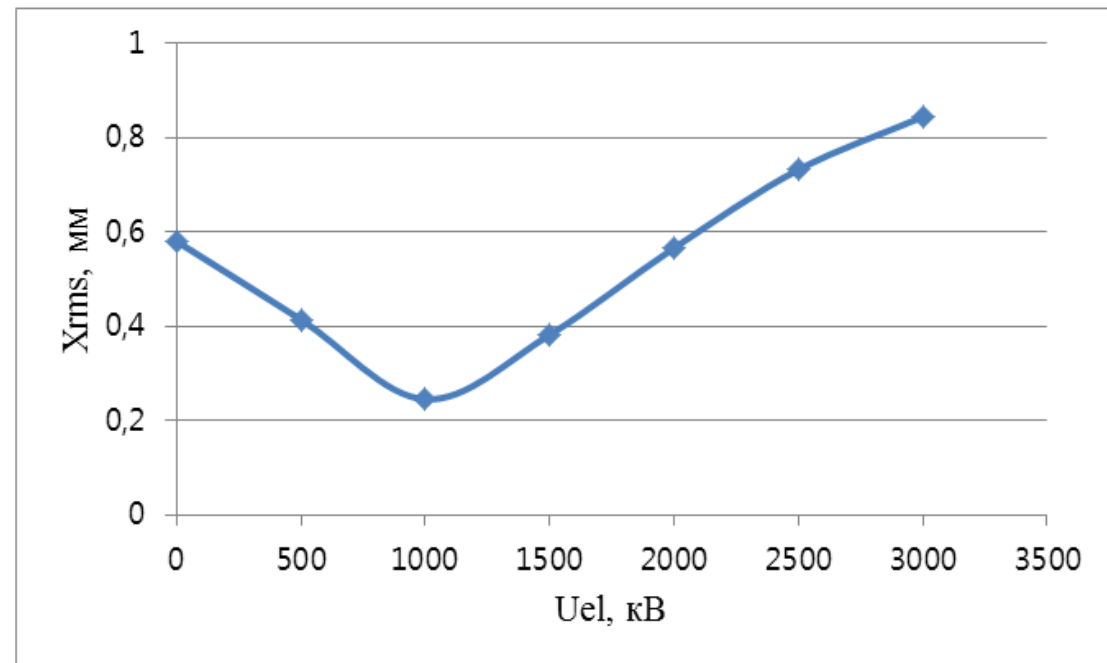


Оптимизация электронной пушки

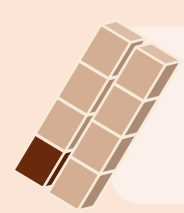
7. Зависимость параметров пучка от напряжения между управляющим электродом и катодом



< Зависимость тока пушки от напряжения на управляющем электроде относительно катода >

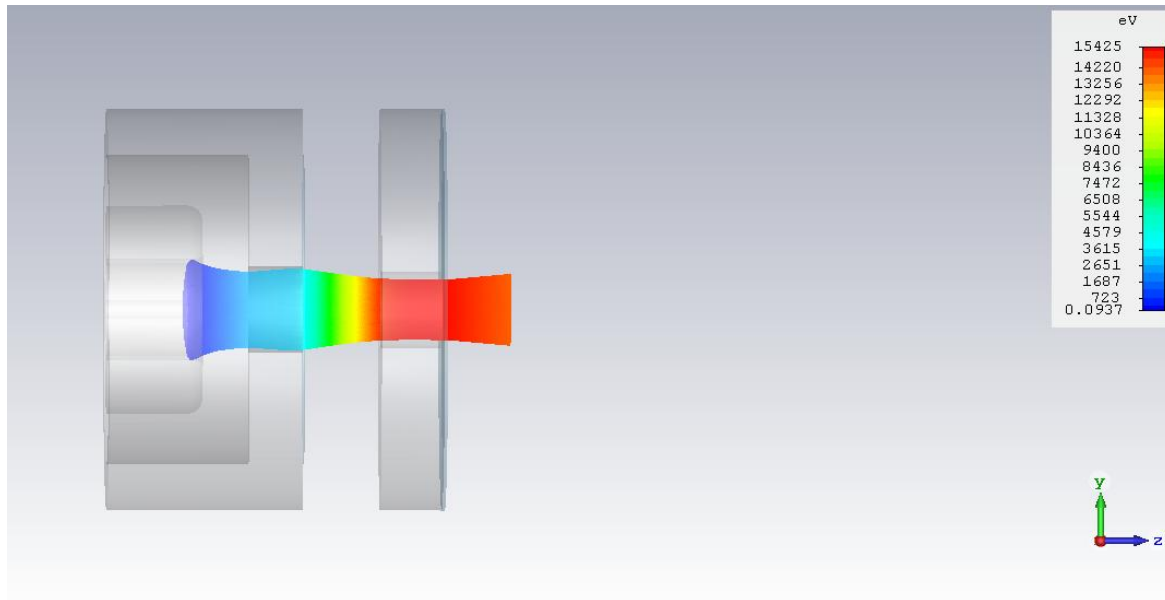


< Зависимость среднеквадратичного размера пучка от напряжения на управляющем электроде относительно катода >

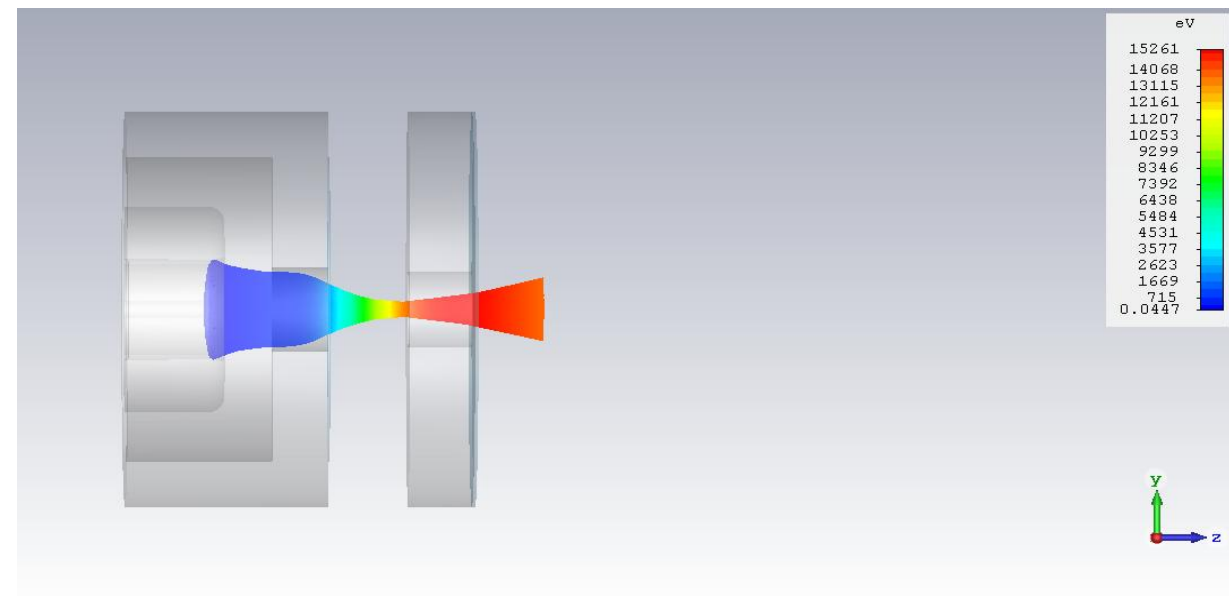


Оптимизация электронной пушки

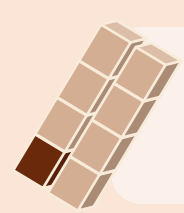
7. Зависимость параметров пучка от напряжения между управляющим электродом и катодом



< Траектории электронов при напряжении на управляющем электроде относительно катода 3 кВ >



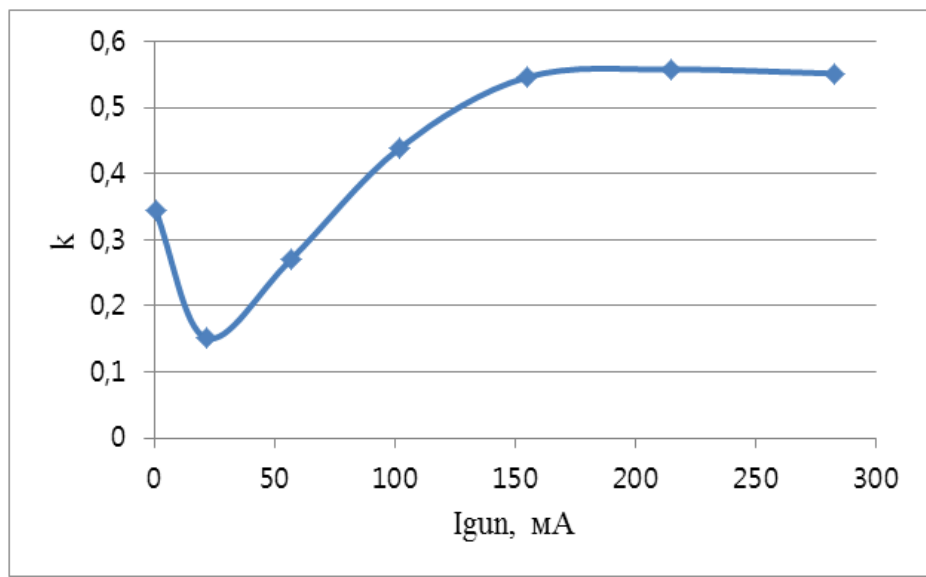
< Траектории электронов при напряжении на управляющем электроде относительно катода 0,5 кВ >



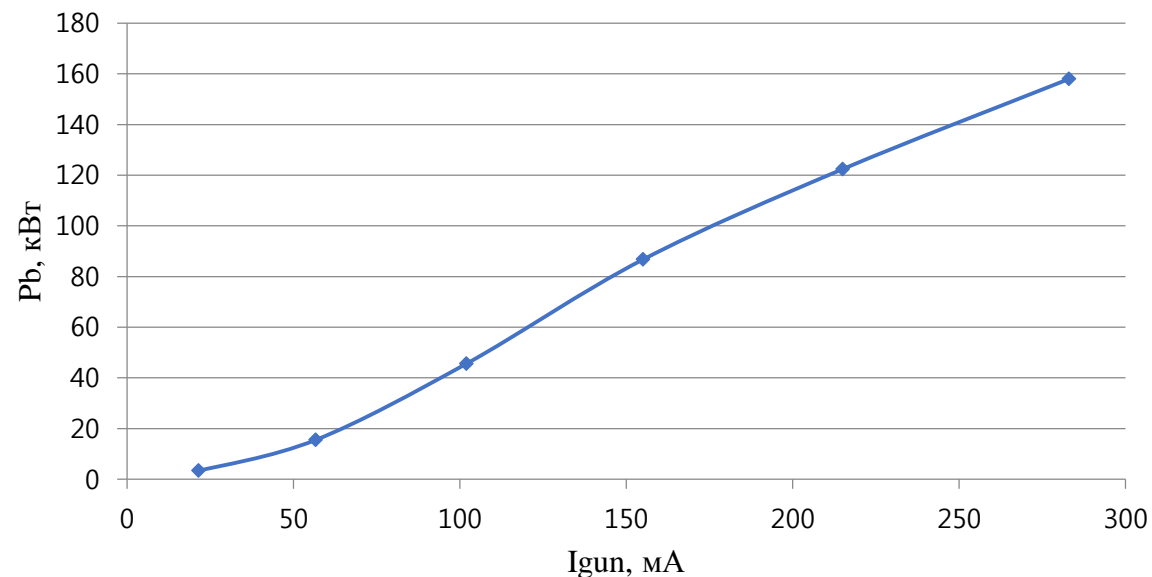
Оптимизация электронной пушки

8. Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре

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



< Зависимость коэффициента захвата электронов в ускоряющей структуре от тока пушки >



< Зависимость суммарной мощности частиц пучка с энергией, большей 800 кэВ, на выходе ускорителя от тока пушки >



Заключение

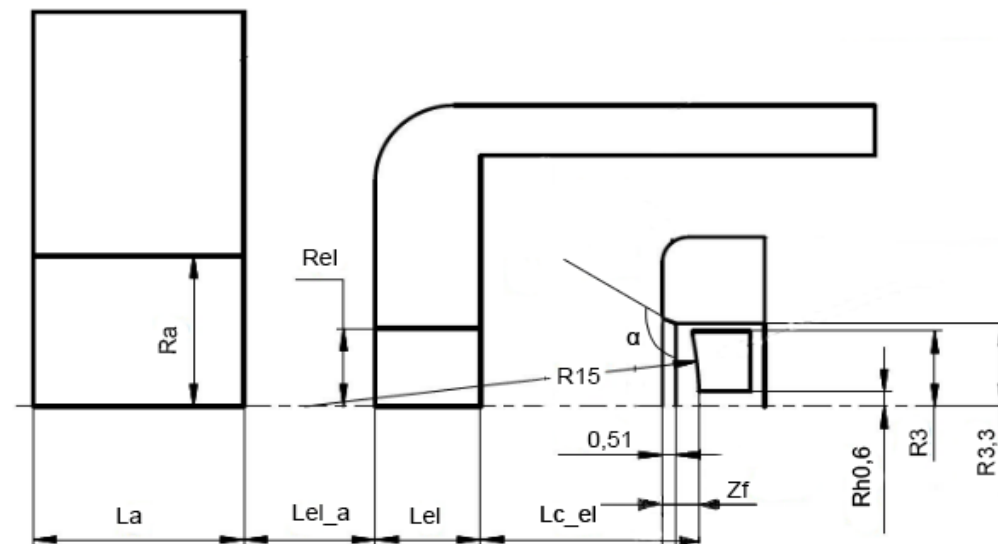
- В этой диссертации были проведены исследования, чтобы получить результаты оптимизации электронной пушки для электрического тока 290мА и обеспечивать сходящийся пучок электронов с энергией 15.5 кэВ на входе в ускоряющую структуру.
- В результате выполнения диссертационной работы была оптимизирована электронная пушка.
- Требуемые параметры были достигнуты, итоговые геометрические размеры приведены в таблице.



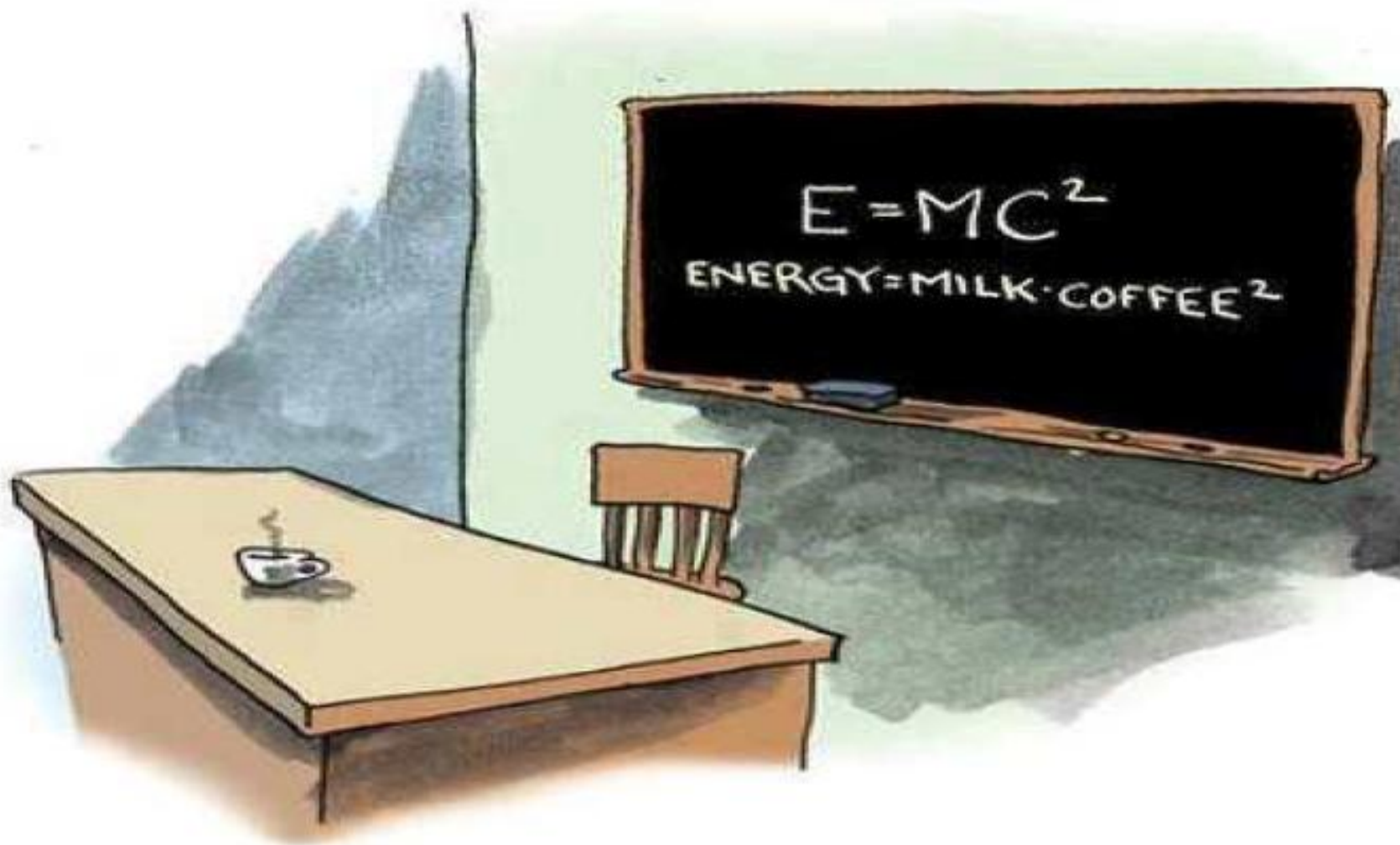
Заключение

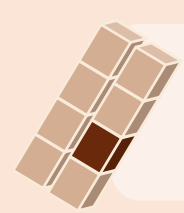
Проектные параметры электронной пушки

Параметр	Значение
Z_f , мм	1,22
α , 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



Спасибо за внимание!





Литература

1. A. Alimov, A. Chepurinov, 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. Chepurinov, 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).



Литература

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)