

**Акимов П.И.¹, Грызлов А.В.¹, Гладышев Д.А.¹,
Смирнов В.А.¹, Чудин В.Г.¹, Шведунов В.И.²**

¹Москва, АО "НПП "Торий",

²НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Проектирование электронной пушки с повышенным сроком службы для линейного ускорителя электронов

Приведены результаты проектирования конструкции электронной пушки с повышенным сроком службы для линейного ускорителя электронов.

Ключевые слова: электронная пушка, линейный ускоритель, электронный пучок.

Работы по созданию конструкций линейных ускорителей электронов, предпринятые в послевоенные годы, в наше время привели к повсеместному нарастанию использования радиационных технологий: в научных исследованиях, самых различных отраслях промышленности, медицины, сельского хозяйства и прочее. Технологии эти, в основном, основаны на применении ускорителей с энергией электронов от 0,5 до 100 МэВ. Отметим, что наиболее распространенным типом является линейный высокочастотный ускоритель электронов. При этом подавляющая часть линейных ускорителей, разрабатываемых для применения в медицине, радиологии, досмотровых комплексах, установках стерилизации спроектированы на мощности пучка не более десятков киловатт и энергию электронов в диапазоне 3 – 20 МэВ. На данный момент следует выделить основные сферы использования и соответствующие им характеристики ускорителей (см. таблицу 1).

Таблица 1. Области применения ускорителей электронов и их параметры

Назначение	Энергия ускоренных электронов, МэВ	Средняя мощность пучка, кВт	Мощность дозы Гр м/мин
Производство радионуклидов	15 – 30	3 – 25	150 – 1500
Активационный анализ	10 – 40	3 – 30	100 – 1500
Стерилизация	5 – 10	10 – 40	300 – 2000
Радиационные технологии	5 – 15	10 – 40	200 – 1500
Инспекционно - досмотровый контроль	5 – 10	0.5 – 10	15 – 50
Лучевая терапия	5 – 40	0.3 – 4	10 – 60
Дефектоскопия	6 – 15	1 – 3	15 – 80

Предприятие АО «НПП «Торий» совместно с НИИЯФ МГУ и лабораторией электронных ускорителей МГУ в течение десятков лет участвует в работах по созданию мощных линейных ускорителей, предназначенных для многофункциональных станций электронной обработки. Разработанный ранее (с использованием созданных на предприятии мощных источников СВЧ энергии) компактный линейный ускоритель на энергию электронов до 10 МэВ со средней мощностью пучка 30-50 кВт применяется для стерилизации продуктов питания и медицинских инструментов. Ускорители с близкими параметрами используются в

качестве источников тормозного излучения высокой энергии в дефектоскопах для радиографического контроля сварных швов и металла большой толщины (до 80 мм по стали). Ускоритель УЭЛР-10-15 работает в режиме стоячей волны и имеет основные параметры, представленные в таблице 2.

Опыт эксплуатации данного ускорителя, как, впрочем, и его зарубежных аналогов, показал, что электронная пушка линейного ускорителя является одним из самых недолговечных конструктивных элементов. В связи с этим в данной работе была поставлена и решалась задача существенного увеличения срока службы электронной пушки данного варианта ускорителя.

Основные параметры ускорителя УЭЛР-10-15 Таблица 2

Энергия пучка	10 МэВ
Мощность пучка	50 кВт
Ширина энергетического спектра	0.5 МэВ
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	70 кВт

В ускорителе УЭЛР-10-15 в качестве инжектора электронов применяется разработанная ранее на предприятии конструкция триодной двух анодной электронной пушки, геометрия электродов ЭОС которой представлена на рис.1. Первый анод выполняет функции управляющего электрода, второй анод находится под потенциалом 50кВ.

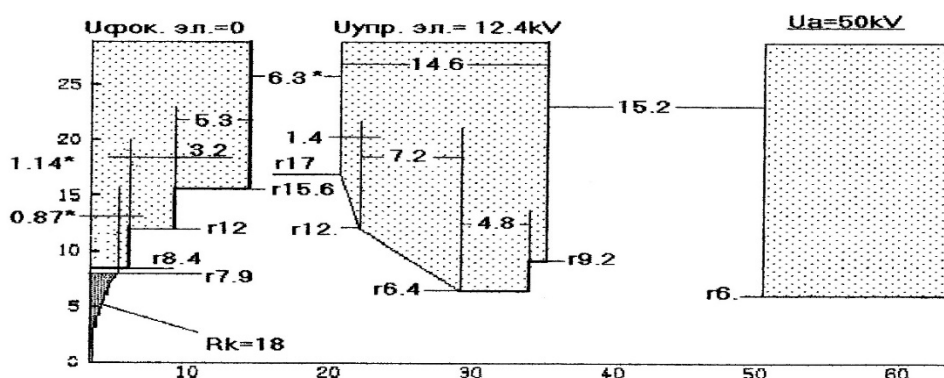


Рис.1. Схема конструкции пушки ЭП-6

Основные параметры пушки ЭП-6 представлены в таблице 3.

Параметры электронной пушки ЭП-6. Таблица 3

Анодное напряжение	50 кВ
Ток луча (импульсный)	800 мА
Радиус луча в кроссовере на уровне 0,5 тока	0,5 мм
Положение кроссовера относительно плоскости анода	26-29 мм
Диаметр анодного отверстия	12 мм

При потенциалах относительно нулевого катода $U_1 = 12.9$ кВ на первом аноде и $U_2 = 50$ кВ на втором аноде данная конструкция пушки позволяет получить импульсный ток $I = 0.8$ А (величина микропервеанса пучка по второму аноду $Pm_2 = 0.072$ мкА/В^{3/2}). Траекторный анализ формирования пучка в пушке был проведен в двумерном приближении, Результаты представлены на рис. 2. Моделирование динамики электронов пучка в ускорительной секции проведено сотрудниками НИЯФ МГУ с использованием программы EGUN.

Проведенные расчеты показали, что кроссовер пучка находится на расстоянии около 36 мм от катода, диаметр пучка в кроссовере - 3 мм. В качестве катода в данном варианте

пушки используется стандартный металлопористый катод диаметром 8,6 мм, изготавливаемый по технологии Леви.

Катод в ускорителях на стоячей волне, в особенности с коротким группирователем (в рассматриваемом варианте ускорителя состоящим из 3 ячеек), подвергается дополнительной бомбардировке не захваченными в процесс ускорения электронами. Проведенное моделирование процессов взаимодействия электронов с СВЧ полем в ускорительной трубке показало, что средняя энергия электронов, возвращающихся на катод, составляет 175 кэВ. При этом величина импульсной мощности, выделяемой на катоде возвращающимися обратно электронами, достигает 7.5 кВт. В режиме минимальной скважности работы ускорителя средняя мощность, выделяющаяся при этом на поверхности катода, может достигать 35-40 Вт, что сравнимо с мощностью нагрева катода.

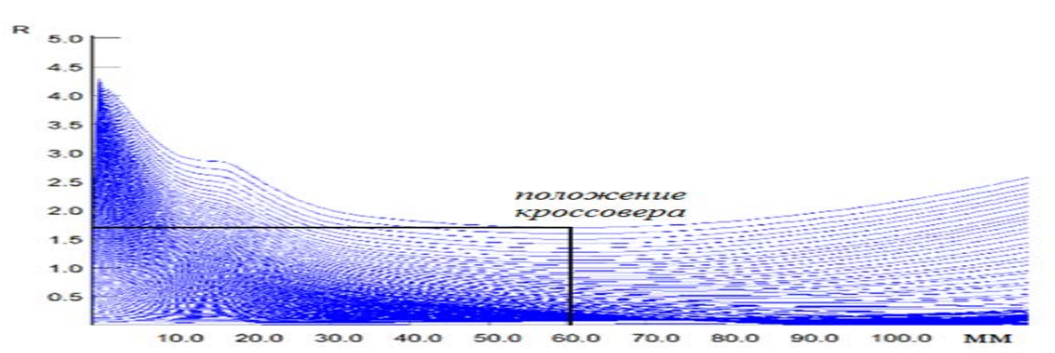


Рис 2. Траектории электронного пучка в пушке ЭП-6

Для повышения долговечности катода было решено увеличить площадь эмитирующей поверхности. При этом в качестве эмиттера вновь разрабатываемой конструкции пушки был выбран вариант эмиттера, используемый в катодном узле пушки ускорителя УЭЛВ-10-10 и хорошо зарекомендовавший себя в процессе длительной эксплуатации.

На рисунке 3 представлена схема усовершенствованной электронно-оптической системы пушки с увеличенным радиусом эмитирующей поверхности катода.

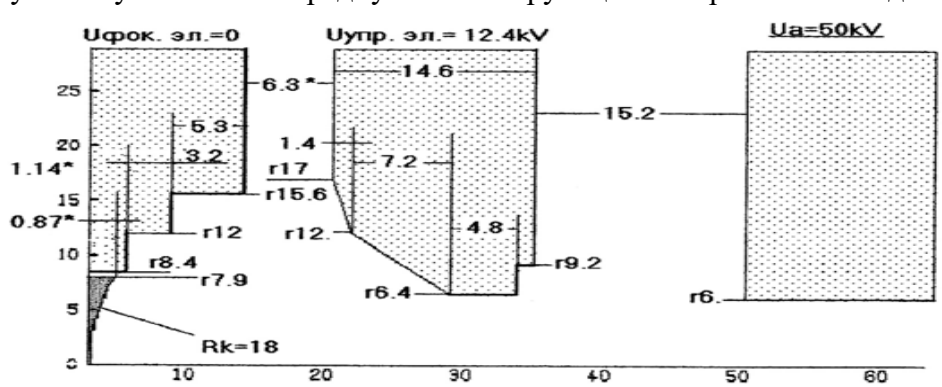


Рис.3 Схема конструкции пушки ускорителя УЭЛР-10-15с диаметром катода 15.8мм

Результаты проведенного двухмерного моделирования движения электронов в варианте модернизированной конструкции пушки ускорителя УЭЛР-10-15 с диаметром катода 15.8мм приведены на рис. 5 (на рисунке отмечено также положение кроссовера пучка в пушке новой конструкции).

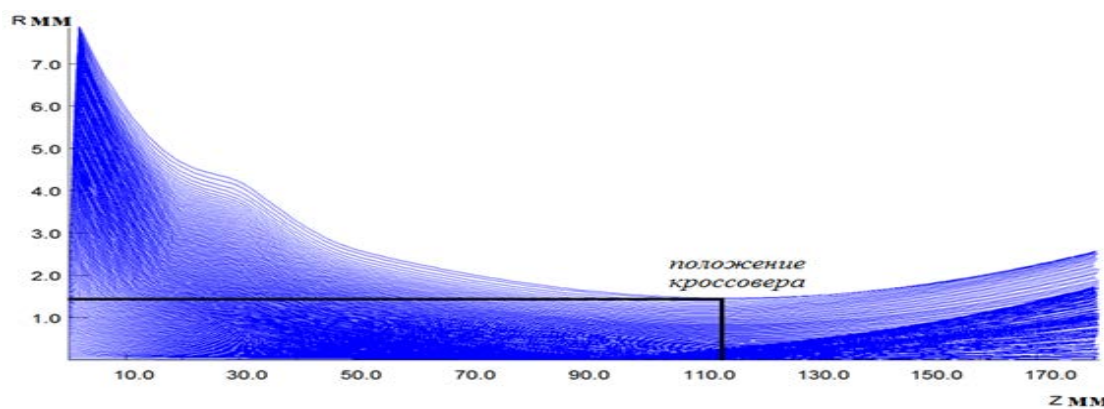


Рис.4 Результаты 2D моделирования траекторий пучка в пушке с диаметром катода 15.8мм.

Дополнительно было проведено моделирование пушки в трехмерном пакете программ CST. Отметим, что результаты 3D моделирования по значениям диаметра пучка в кроссовере и положению последнего показали практически полное совпадение с представленными на рис.4.

Результаты сравнения параметров пушки ЭП-6 с эмиттером диаметром 8.6 мм и проектируемой пушки с катодом 15.8 мм приведены в таблице 4.

Сравнение параметров пучков

Таблица 4

Диаметр эмиттера пушки, мм	8.6	15.8
Ток пучка I, А	0,865	0,8
Энергия электронов пучка на выходе, кЭв	50	50
Удаление кроссовера от поверхности эмиттера, мм	60	115
Радиус пучка в кроссовере, мм	1,6	1,4
Радиус пучка на выходе из пушки, мм	2,1	2,4
Переванс по управляющему электроду, $A/V^{3/2}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$5,75 \cdot 10^{-7}$
Переванс пучка на выходе пушки, $A/V^{3/2}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$
Плотность тока на катоде, A/cm^2	1,5	0,41

Как следует из представленных в таблице 4 результатов анализа, кроссовер пушки с диаметром катода 15,8 мм находится на большем удалении от катода, чем в варианте ЭП-6 с эмиттером диаметром 8.6 мм. Это обеспечивает более высокое токопрохождение электронов в пушке модифицированной конструкции. Кроме того, благодаря увеличению диаметра катода плотность эмиссионного тока снижается более чем на 70%. Изменение радиуса пучка и коэффициента захвата («токопрохождения») в процессе ускорения для старой (штатной) и новой пушек, рассчитанные сотрудниками профессора Шведунова В.И., приведены на рис.5а и рис.5б.

Представленные на рис. 5 зависимости однозначно подтверждают, что с использованием новой конструкции электронной пушки характеристики прохождения пучка через ускоряющую структуру заметно улучшились.

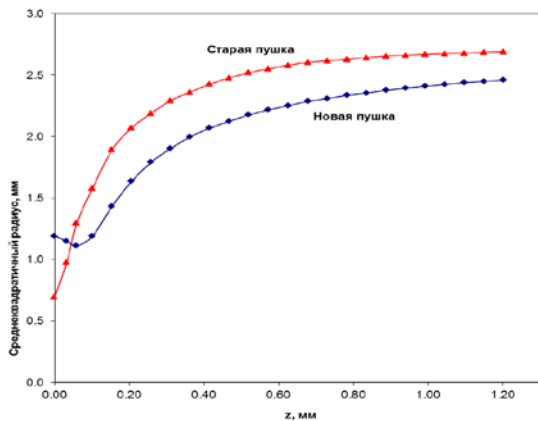


Рис.5а. Радиус пучка

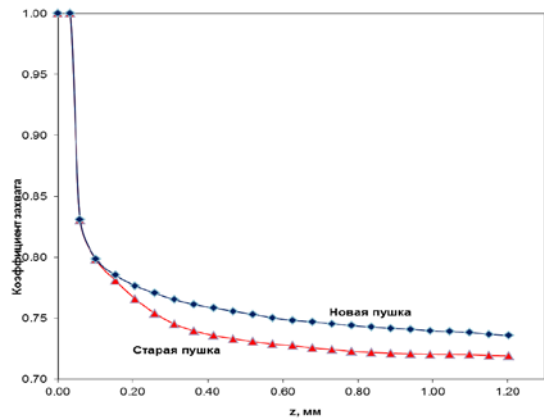


Рис.5б. Коэффициент захвата

Проведенные расчеты и проектирование модернизированной конструкции электронной пушки для линейного ускорителя электронов и результаты сравнительного моделирования обеих конструкций показали, что с увеличением размера катода и степени компрессии пучка удалось добиться удаления кроссовера пучка от эмиттера при снижении плотности пространственного заряда пучка в прикатодной области и заметном уменьшении величины напряженности электрических полей в области между катодом и управляющим электродом. Достигнутые результаты позволяют многократно увеличить срок службы и надежность работы катода, повысив тем самым долговечность ускорителя при снижении эксплуатационных расходов.

Библиографический список

1. Акимов П.И., Грызлов А.В., Гладышев Д.А., Невский П.В., Сигалаев В.Н., Чудин В.Г. Модернизация конструкции электронной пушки линейного ускорителя электронов. Материалы XXII научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника" под редакцией академика А.С. Бугаева. М. ISBN 978.5-600-01145-8. 2015г. с.279 - 283.