

ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЛУ-10***В.Ф. Жигло, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, Л.И. Селиванов******Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина******E-mail: zhiglo@kipt.kharkov.ua***

Приведены результаты расчета и конструкция диодной пушки для линейного ускорителя электронов ЛУ-10, разрабатываемого в НИК "Ускоритель" ННЦ ХФТИ для радиационного материаловедения и стерилизации медицинской продукции. В пушке используется импрегнированный WВа-катод с плотностью эмиссии $3,5 \text{ А/см}^2$. Расчетный ток пучка $0,44 \text{ А}$ при энергии электронов 80 кэВ .

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения производительности технологии радиационной стерилизации продукции медицинского назначения в ННЦ ХФТИ и проведения научных исследований в материаловедении необходимо повышение средней мощности пучка действующего ускорителя ЛУ-10, что требует его реконструкции.

Проектом реконструкции предусмотрено снижение импульсного тока пучка до 400 мА . Повышение средней мощности пучка, при этом, достигается за счет повышения частоты следования импульсов до 600 Гц и их длительности до 10 мкс . Снижение импульсного тока позволяет заменить существующий катод из LaB_6 диаметром 17 мм более эффективным импрегнированным WВа-катодом [1] диаметром 4 мм и заменить существующую пушку ускорителя с мощностью накала $\sim 300 \text{ Вт}$ маломощной диодной пушкой с мощностью $\leq 20 \text{ Вт}$, не требующей водяного охлаждения. Наряду с этим, снижение температуры катода от 1600°C , типичной для LaB_6 , до 1000°C (WВа) позволяет использовать многоразовые мягкие упругие прокладки в вакуумных уплотнениях, что упрощает замену катодов.

Как следует из работы [2], реальный срок службы импрегнированных катодов в техническом вакууме составляет 10000 ч при плотности эмиссии $j = 5 \text{ А/см}^2$. Поэтому при расчете пушки задавалось условие $j < 5 \text{ А/см}^2$.

Важным преимуществом LaB_6 -катодов является сохранение их эмиссии при воздействии атмосферы на холодный (отключенный блокировкой) катод. Такая ситуация возникает в технологических ускорителях из-за особенностей их конструкции, при которой установка промежуточного вакуумного клапана в канале транспортировки пучка из пушки в ускоритель нежелательна по динамике пучка. Хотя, некоторые типы импрегнированных катодов выдерживают до десяти напусков атмосферы на холодный катод за 300 ч работы [1], ресурс их работы все же надежно не установлен. Это обстоятельство связано с технологией (запасом активного вещества и материалом губки) и условиями эксплуатации катода. Существует также большой разброс параметров даже в одной партии изготовленных катодов. Поэтому, при разработке пушки уделялось внимание возможности перехода на катод из LaB_6 без существенного изменения ее конструкции.

Предполагается безмасляный рабочий вакуум $5 \cdot 10^{-7} \text{ Торр}$ в системе с магнитоэрозийным насосом. Давление при активировке катода $\leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ Торр}$.

1. КОНСТРУКЦИЯ ПУШКИ

В качестве источника электронов выбрана диодная пушка с магнитоизолированным сферическим катодом. Пушка подсоединяется к фланцу группировочной системы ускорителя внутри соленоида, формирующего удерживающее магнитное поле на длине группировки и участке переменной фазовой скорости ускоряющей секции. В связи с недоступностью к фланцевому соединению пушки с ускорителем без разборки магнитной системы для монтажа катода и формирующих электродов требуется отдельный фланец в вакуумной камере пушки.

1.1. ВАКУУМНАЯ КАМЕРА И МОНТАЖ ЭЛЕКТРОДОВ

Устройство пушки показано на Рис. 1.

Вакуумная камера пушки состоит из двух цилиндров: из углеродной магнитомягкой стали (6) и нержавеющей немагнитной стали (5). Соединительные с ускорителем фланцы (7) и (8) и патрубок для откачки (16) также из углеродной стали – для экранировки катода (10) от магнитного поля соленоида.

Вакуумное уплотнение осуществляется плоским кольцом (18) из витона между керамическим фланцем высоковольтного разъема (2) и высоковольтным изолятором катода (11). Сжатие этого кольца производится болтами (4) в накидной гайке (3) через керамический фланец высоковольтного разъема (2) и резиновую прокладку (9), изолирующую разъем от атмосферы. Изолятор (11) опирается на выступ в вакуумной камере через дюралюминиевую калиброванную по толщине плоскую прокладку (17), ограничивающую степень сжатия мягкого витонного уплотнения (18) и фиксирующую, таким образом, продольное положение изолятора с катодом. Импульсное напряжение 80 кВ и напряжение накала катода подается по кабелю (1) через высоковольтный разъем (2) и проходной керамический изолятор накала в корпусе держателя венельта. Электрический контакт катода осуществляется точечной сваркой вывода катода с контактным штырем через отверстия в держателе венельта. Крепление венельта к держателю производится контактной точечной сваркой стягивающих никелевых лепестков.

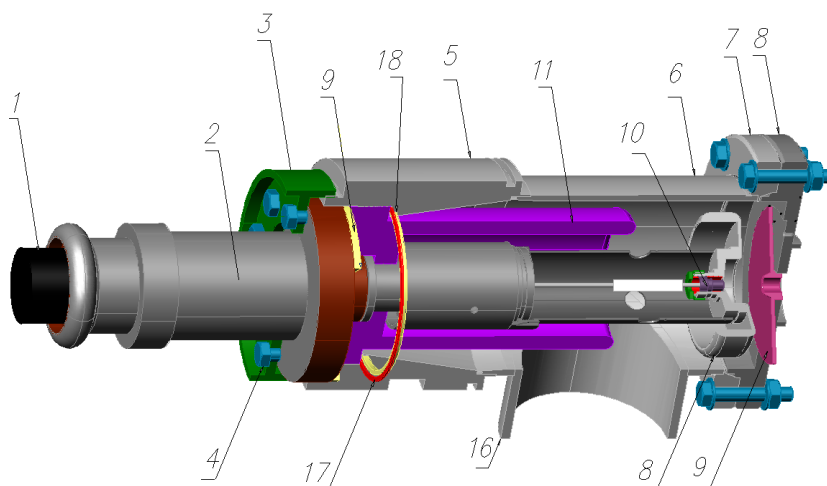


Рис. 1. Схематическое устройство электронной пушки

Анод (9) крепится на фланце ускорителя. Держатель катода монтируется на венельте, как это видно из Рис. 2.

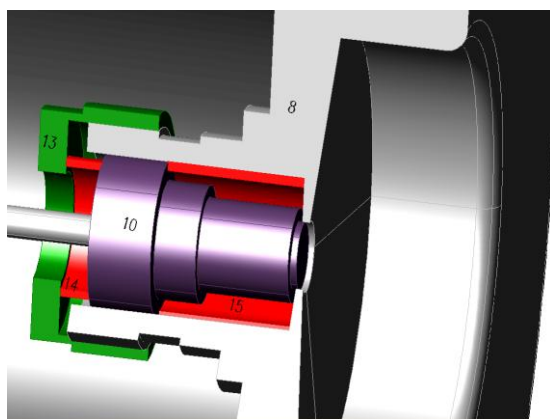


Рис. 2. Монтаж катода.

8 – венельт; 10 – катод; 13 – накидная гайка;

14 – цилиндрический прижим;

15 – цилиндрический упор

Накидной гайкой (13) через цилиндрический прижим (14) катод прижимается к калиброванному по высоте цилиндрическому упору (15). Центровка катода производится по его основанию. Такой монтаж позволяет фиксировать катод относительно венельта без дополнительных юстировочных операций. Спекание накидной гайки (13) с держателем катода предотвращается сухой графитовой смазкой резьбы.

1.2. ЗАМЕНА КАТОДА

Особенностью режима технологических ускорителей являются повышенные токи пучка и, связанные с этим, повышенная аварийность в вакуумной системе и высокая плотность эмиссии катода. Такие условия работы сокращают срок службы катодов и требуют их частой замены. В связи с этим, для технологических ускорителей создаются пушки особого типа, так называемые разборные пушки, важной характеристикой которых является простота их разборки для замены катода. Для разборки разработанной пушки достаточно отпустить болты (4) (см. Рис. 1) и, сняв накидную гайку (3), извлечь высоко-

вольтный изолятор (11) с укрепленными на нем венельтом и катодом. Доступ к катоду можно получить после отсоединения венельта, разорвав ножом стягивающие никелевые лепестки. После этого катод извлекается снятием накидной гайки (13 на Рис. 2). Для установки нового катода сборка пушки производится в обратном порядке.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ И ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

2.1. ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ПУЧКА

Параметры пучка в кроссовере и продольное распределение магнитного поля подбирались для получения необходимых параметров [3] выходного пучка ускорителя. Магнитное поле моделировалось с помощью программы SUPERFISH/POISSON [4], а движение электронов в ускорителе – с помощью PARMELA [5]. Необходимые параметры пушки и пучка, полученные в результате таких расчетов, приведены в Таблице.

Геометрия электродов, необходимых для реализации заданных в Таблице параметров пучка, получена численным моделированием с помощью программы EGUN [6]. Результаты приведены на Рис. 3.

Техническое задание на разработку электронной пушки

Энергия электронов	80 кэВ
Геометрический эмитанс в кроссовере	≤ 5 мм·мрад
Расстояние кроссовера от катода	≥ 39 мм
Диаметр пучка в кроссовере (4σ)	≤ 3 мм
Ток пучка в импульсе	0,44 А
Длительность импульса	10 мкс
Частота следования импульсов	600 Гц
Охлаждение корпуса	Свободная конвекция
Тип пушки	Разборная пушка со сменным катодным узлом

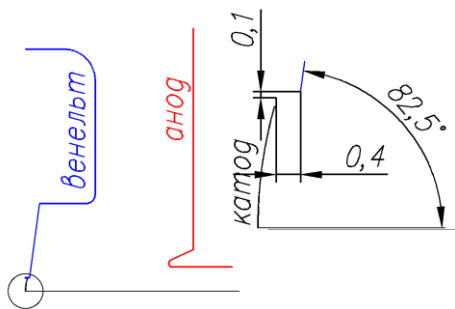


Рис. 3. Расчетная форма электродов пушки. Справа – увеличенная область катода. Размеры в мм

Особенностью геометрии является увеличенный диаметр венельта. Это связано с необходимостью экранировки отверстия для откачки (16) (см. Рис. 1), нарушающего аксиальную симметрию электрического поля в промежутке анод-катод. Другой особенностью, как можно видеть из Рис. 3, является углубление катода на $\Delta X = 0,4$ мм относительно края отверстия в венельте. Как было показано экспериментально и численными расчетами [7], такая мера подавляет усиление эмиссии к краю катода, что продлевает срок его службы.

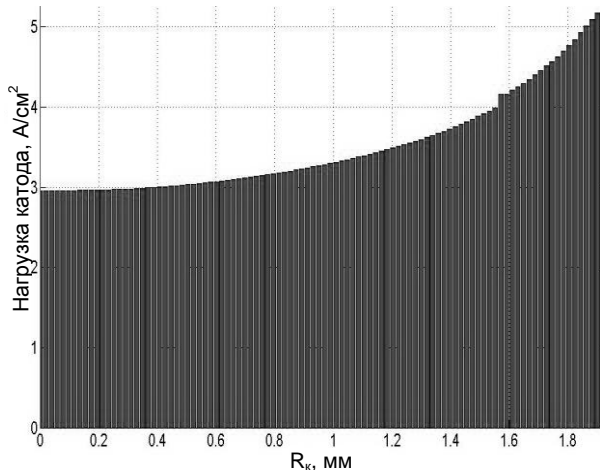


Рис. 4. Расчетное распределение плотности эмиссии по радиусу катода, $\Delta X = 0$

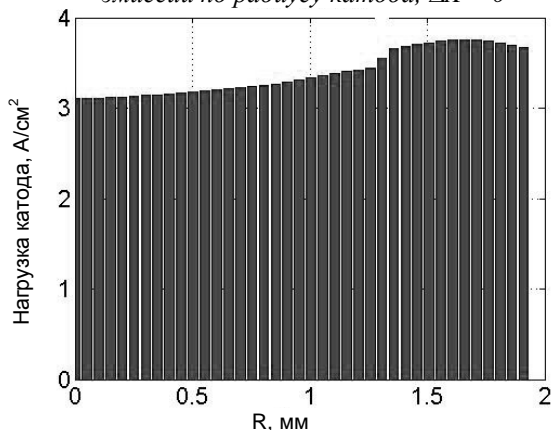


Рис. 5. Расчетное распределение плотности эмиссии по радиусу катода, $\Delta X = 0,4$ мм

Эффект выравнивания эмиссии по радиусу катода при токе пучка 0,44 А, полученный расчетом по программе EGUN, можно видеть из Рис. 4 и 5. Максимальная плотность эмиссии уменьшилась в 1,4 раза.

Как показали расчеты, углубление катода, наряду с выравниванием плотности эмиссии, приводит к уменьшению тока и нарушению ламинарности пучка. Поэтому величина углубления ΔX имеет оптимум, который и был принят в конструкции разработанной пушки.

2.2. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Как следует из Таблицы, требования к геометрическим параметрам пучка касаются, в основном, предельных их значений, что связано, прежде всего, с ограничением радиационного фона в зале обслуживания ускорителя. Для максимального снижения фона желательно получить минимальное значение требуемых параметров.

Наименьший эмиттанс имеет ламинарный пучок из холодного катода. Поэтому в расчетах удовлетворительной считалась геометрия, дающая наибольшее приближение к ламинарному потоку (наименьшее число пересечений токовых линий) при холодном катоде. Изображение токовых линий такого квазиламинарного пучка при электродах из Рис. 3 приведено на Рис. 6.

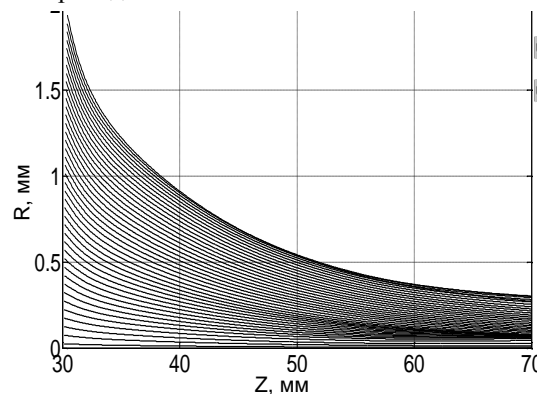


Рис. 6. Расчетные токовые линии пучка электронов при температуре катода $T = 0$

Для расчета параметров пучка в разработанной пушке принималась температура катода 1300 К, необходимая для плотности эмиссии ~ 4 А/см². Структура потока в этом случае приведена на Рис. 7.

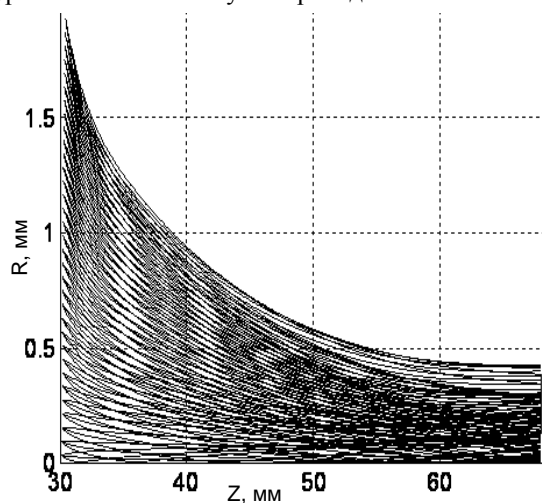


Рис. 7. Расчетные токовые линии пучка при температуре катода $T = 1300$ К

Расстояние от катода до кроссовера составляет 39 мм, нормализованный эмиттанс $\epsilon_n = 1,53 \cdot \pi$ мм·мрад, диаметр пучка в кроссовере 0,92 мм, геометрический эмиттанс, 2.64 π ·мм·мрад, ток пучка 0,44 А. Сравнение полученных в этом расчете параметров с приведенными в Таблице позволяет сделать вывод, что разработанная пушка удовлетворяет предъявляемым требованиям. Внешний вид изготовленной пушки показан на Рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид пушки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J.L. Cronin. Modern Dispenser Cathodes // *IEE Proc.* 1981, v. 128, № 1, p. 19-32.
2. Л.А. Ашкинази. *Материалы электронных эммиттеров*. Москва: "МИЭМ", 2007, 67с.
3. Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня и др. Ускоряющая система технологического ускорителя электронов // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2012, № 4, p. 24-28.
4. J.H. Billen, L.M. Young. POISSON SUPERFISH on PC compatibles // *Proc. 1993 Particle Accelerator Conf. Washington (USA)*. 1993, p. 790-792.
5. M. Young. PARMELA: preprint Los Alamos, 1996. / *Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835*.
6. W.B. Herrmannsfeldt. EGUN: Electron Optics Program / *Stanford Lin. Acc. C-r, SLAC-PUB-6729*, 1994.
7. F. Hegele, M. Friedman, et al. Reduction of Edge Emission in Electron Beam Diodes // *Physics of Plasmas*. 2002, v. 9, № 10, p. 4309-4315.

Статья поступила в редакцию 11.10.2017

ELECTRON GUN FOR THE LU-10 ELECTRON LINAC

V.Ph. Zhiglo, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, L.I. Selivanov

The numerical simulation results and design of the diode gun for the LU-10 linac, developed in the "Accelerator R&D" NSC KIPT for radiation material science and sterilization of medical products, are presented. The gun uses an impregnated WBa cathode with the emission density of 3.5 A/cm². The calculated beam current is 0.44 A, with the electron energy of 80 keV.

ЕЛЕКТРОННА ГАРМАТА ДЛЯ ПРИСКОРЮВАЧА ЛУ-10

В.Ф. Жигло, В.А. Кушнір, В.В. Мітроченко, Л.І. Селіванов

Наведено результати розрахунку і конструкція діодної гармати лінійного прискорювача електронів ЛП-10, що розробляється в НДК "Прискорювач" ННЦ ХФТІ для радіаційного матеріалознавства і стерилізації виробів медичного призначення. У гарматі використовується імпрегнований WBa-катод з щільністю емісії 3,5 А/см². Розрахунковий струм пучка 0,44 А при енергії електронів 80 кеВ.