

ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ ДЛЯ НИЗКОВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик, созданных газоразрядных электронных пушек ЭПП-6 и высоковольтной – ЭПП-14 с полым анодом и холодным катодом для низко вакуумных технологий в диапазоне давлений ниже $P < 1200$ Па, при ускоряющих напряжениях $U_u < 100$ кВ. Максимальная мощность инжектируемого электронного пучка в импульсе составляла $N_u \leq 10^6$ Вт.

Приводяться результати експериментальних досліджень вольт-амперних характеристик, створених газорозрядних електронних гармат ЭПП-6 і високовольтної – ЭПП-14 з порожнім анодом і холодним катодом для низько вакуумних технологій в діапазоні тисків нижче $P < 1200$ Па, при прискорювальних напругах $U_u < 100$ кВ. Максимальна потужність інжектуємого електронного пучка в імпульсі становила $N_u \leq 10^6$ Вт.

Results of experimental researches volt-амперных of the characteristics, created gas-discharge electronic guns ЭПП-6 and high-voltage - ЭПП-14 with the hollow anode and the cold cathode for low vacuum technologies in a range of pressure below $P < 1200$ Pa, at accelerating voltage $U_u < 100$ kV. The maximal capacity of an injected electronic beam in an impulse made $N_u \leq 10^6$ Wt.

1. Введение

Импульсные электронные пучки представляют практический интерес для реализации разнообразных низковакуумных электронно-лучевых технологических процессов: инженерии поверхности материалов, плазмохимических технологий, получения покрытий, диагностики и визуализации газовых потоков, ионизации и возбуждения газовых потоков, нагревания поверхностей изделий, испытания теплозащитных покрытий и многих других [1...6]. Традиционная электронно-лучевая техника, используемая для решения подобных задач, требует наличия в системе вывода электронного пучка в рабочую среду сложной дифференциальной откачки. Основные трудности при реализации низковакуумных электронно-лучевых технологий заключается в том, что получение электронных пучков осуществляется в высоком вакууме при давлениях ниже 10^{-2} Па, а их использование – в низком при давлениях выше 10 Па. В связи с этим возникает задача создания импульсных электронных пушек, работающих в низком вакууме в диапазоне давлений 10...1000 Па и ускоряющих напряжениях 2...100 кВ. Перспективным путем ее решения является применение газоразрядных электронных пушек с холодным катодом и полым анодом (ЭПП), работающих на принципе извлечения электронного пучка из высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) при давлениях $P < 10$ Па

[1, 2] и создание на их основе низковакуумных газоразрядных электронных пушек [7].

2. Постановка задачи

Целью работы является проведение исследований физических процессов, протекающих в ЭГП, выявление закономерностей, влияющих на повышение их рабочего давления и создания на этой основе конструкций низковакуумных ЭГП для низковакуумных электронно-лучевых технологий.

3. Низковакуумная газоразрядная электронная пушка ЭГП-6

Для реализации поставленной задачи была создана конструкция газоразрядной электронной пушки ЭГП-6 с холодным катодом, работающая на основе извлечения электронного пучка из высоковольтного тлеющего разряда (ВТР).

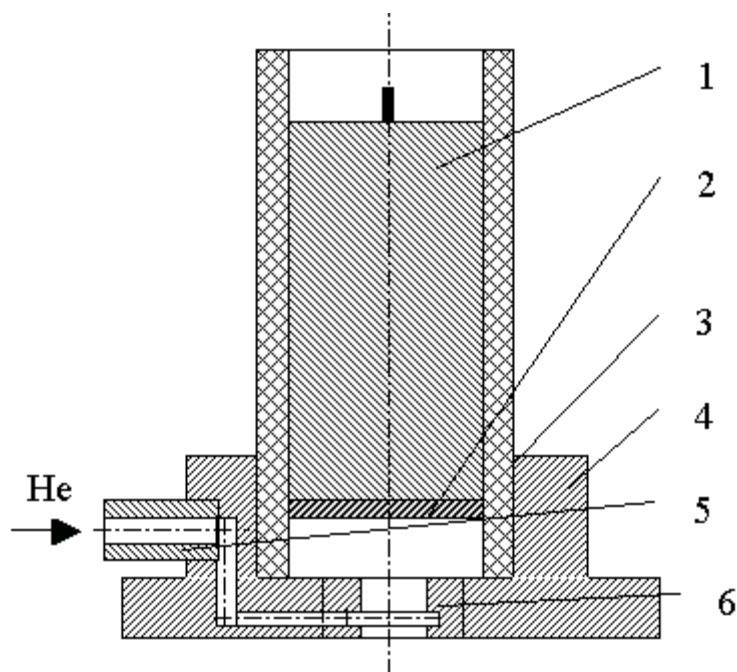


Рисунок 1 - Схема газоразрядной электронной пушки ЭГП-6

Она состоит (рис.1) из следующих основных элементов: катодного узла – 1; катодной вставки -2; высоковольтного изолятора – 3; корпуса анода -4; системы поддува рабочего газа (He); анодной вставки – 6. При работе электронной пушки анод заземляется, а на катод подается высокое напряжение. Электрическая прочность изоляция между анодом и катодом обеспечивается с одной стороны конструкцией высоковольтного керамического изолятора, а с другой – создания условий работы в междуэлектродном промежутке в области левой ветви кривой зажигания Пашена. После подачи высокого напряжения на электронную пушку в области анодного отверстия зажигается высоковольтный тлеющий разряд. Электрическое поле между анодом и катодом сформировано таким образом, что наиболее благоприятные условия зажигания ВТР осуществляются

вдоль осевой линии. Ионы разряда двигаются к катоду и выбивают из него вторичные электроны, которые ускоряются в между электродном промежутке анод-катод и в виде электронного пучка выходят из анодного отверстия за пределы электронной пушки в технологическую зону. На своем пути быстрые электроны пучка ионизируют рабочий газ, образуя новые ионы и медленные электроны. Последние двигаются к аноду и компенсируют заряд, ушедших из пушки электронов пучка. Общий вид ЭП-6 двух модификаций приведен на рис.2. В качестве материала катода использовался алюминий. В зависимости от мощности, генерируемого электронного пучка и времени работы пушки для охлаждения катода в одних модификациях использовался медный радиатор с естественным охлаждением, в других – принудительное жидкое охлаждение.

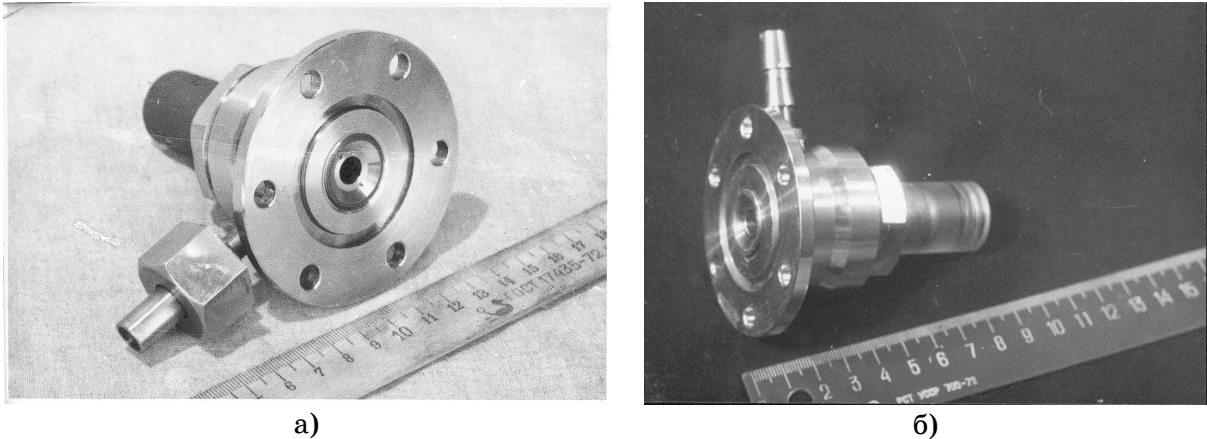


Рисунок 2 - Общий вид ЭП-6

Корпус анода и анодная вставка изготавливались из нержавеющей стали. В качестве высоковольтного изолятора использовалась керамика марки 22ХС. Междуэлектродное расстояние анод - катод в ЭП-6 регулировалось перемещением анодной вставки 6 в корпусе анода 4 за счет резьбового соединения. Размеры анодного отверстия изменялись путем замены анодной вставки на вставку с другим диаметром анодного отверстия.

Основные параметры газоразрядной электронной пушки ЭП-6 следующие:

- ускоряющее напряжение - $U \leq 40\text{кВ}$;
- длительность импульса напряжения - $\tau_u \leq 5\text{мкс}$;
- частота следования импульсов - $f_c \leq 400\text{Гц}$;
- диаметр электронного пучка - $d \geq 5\text{мм}$;
- мощность электронного пучка в импульсе - $P_u \leq 350\text{кВт}$;
- время непрерывной работы - $t_p \leq 0,5\text{час}$;
- вес пушки - $0,7\text{ кг}$.

4. Высоковольтная газоразрядная электронная пушка ЭП-14

Задача повышения рабочего напряжения решалась путем установки в конструкции газоразрядной электронной пушки ускоряющих электродов

позволяющих равномерно распределять ускоряющее напряжение в промежутке катод-анод.

На основании теоретических исследований была выполнена разработка высоковольтной импульсной газоразрядной электронной пушки ЭПП-14 (рис.3, 4).

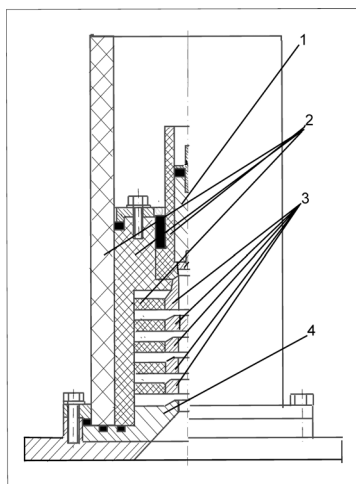


Рисунок 3 - Схема высоковольтной газоразрядной электронной пушки ЭПП-14



Рисунок 4 - Общий вид ЭПП 14

Пушка (рис.3) включает в себя следующие элементы: 1 –катод, 2 – изоляторы, 3 – ускоряющие электроды, 4 – анод.

Электрическая прочность промежутка анод-катод, находящегося в вакууме, создается за счет газовой изоляции путем работы ее в левой ветви кривой зажигания Пашена. В то же время необходимо обеспечить достаточную длину изоляционного промежутка по поверхности. Эта задача решается путем изготовления специальных проточек. Для обеспечения равномерности распределения электрического поля и увеличения электрической прочности в межэлектродном пространстве анод-катод установлены ускоряющие электроды, позволяющие увеличить длину изоляционных промежутков между ними.

Пушка рассчитана для работы в импульсном режиме. Охлаждение элементов пушки естественное, что снижает время ее работы. Электронная пушка формирует цилиндрический электронный пучок. Повышение мощности ЭПП может достигаться за счет использования принудительного охлаждения элементов пушки.

Основные параметры пушки:

- ускоряющее напряжение - $U \leq 100 \text{ кВ}$;
- длительность импульса - $\tau_u \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$;
- частота следования - $f_c \leq 200 \text{ Гц}$
- диаметр электронного пучка - $d_A = 0,008 \text{ м}$;
- габаритные размеры – диаметр основания - $d = 180 \text{ мм}$, высота - $h = 200 \text{ мм}$.

- мощность электронного пучка в импульсе - $P_u \leq 10^6 \text{ Вт}$;
- средняя мощность - $P_{cp} \approx 10^3 \text{ Вт}$
- время непрерывной работы - $t_p \leq 0,5 \text{ час}$.

5. Результаты исследований и их обсуждение

Проводились экспериментальные исследования характеристик ЭГП-6 с использованием оборудования и методики изложенной в [7].

Импульсные вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки ЭГП-6, приведенные на рис.5, экспериментально измерены в гелии при различных давлениях. (1- 133 Па; 2 – 106 Па; 3 – 53 Па. В качестве рабочего газа использовался гелий. Диаметр катода составлял $d_k = 8 \text{ мм}$; диаметр анодного отверстия – $d_A = 9 \text{ мм}$; между-электродное расстояние $L_{AK} = 1 \text{ мм}$. Характеристики построены в двойном логарифмическом масштабе и представляют собой наклонные прямые линии. Эти результаты хорошо согласуются с результатами работы [8].

В Табл.1 приведены результаты аппроксимации вольт-амперных характеристик, показанных на рис.5, эмпирическими формулами вида

$$I_n = f(P) \cdot U_n^m,$$

где I_n , U_n – ток и напряжение газоразрядной электронной пушки; $f(P)$ – функция давления

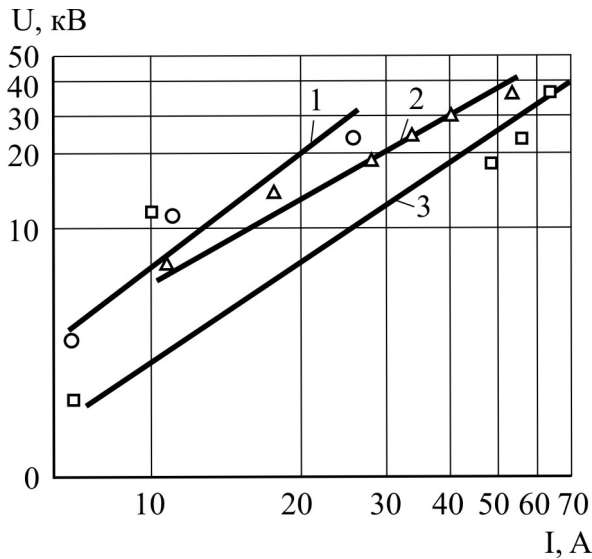


Рисунок 5 - Вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки ЭГП-6 в импульсном режиме работы

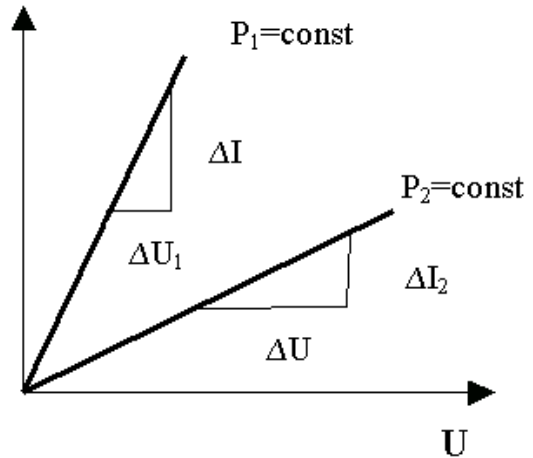


Рисунок 6 - Типовые вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки

Таблица 1

Номер характеристики	Рабочее давление гелия He, Па	$f(P)$	m
1	133	2,0658	1,0104
2	106	1,6587	0,955
3	53	0,3777	1,334

Величина функции $f(P)$, как видно из таблицы, растет с повышением давления. При этом происходит рост тока в ВТР и снижение ускоряющего напряжения. Поэтому оценку влияния рабочего давления на параметры ЭПП целесообразно осуществлять с использованием параметра, учитывающего изменение как тока, так и напряжения. В качестве этого параметра была использована крутизна вольт-амперных характеристик. На рис.6 приведены типовые вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки при различных давлениях ($P_1 < P_2$) в двойном логарифмическом масштабе. Как видно из рис. 6 с увеличением давления газа крутизна вольт-амперных характеристик возрастает

$$S_2 = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} > S_1 = \frac{\Delta I_1}{\Delta U_1} \quad \text{для } P_2 > P_1.$$

В связи с этим для повышения рабочего давления газоразрядной электронной пушки необходимо, чтобы при повышении давления $P_2 > P_1$ крутизна характеристик не изменялась и $S_2 = S_1$.

Анализ вольт-амперных характеристик (рис.5) позволил выделить следующую закономерность: увеличение рабочего давления P в ЭПП-6 приводит к росту тока электронного пучка I_u , снижению ускоряющего напряжения U_u при постоянной мощности источника питания. Это явление связано с интенсификацией процессов ионизации в ВТР с ростом давления.

Крутизна S семейства вольт-амперных характеристик (рис.5), приведенная на рис. 7, показывает ее рост с увеличением давления.

При создании газоразрядных электронных пушек практический интерес представляет повышение их рабочего давления. Это позволяет реализовывать на их основе новые технологические процессы и упрощать используемое оборудование. Влияние междуэлектродного расстояния L_{AK} на параметры электронного пучка представлено на рис. 8.

Из характеристик возможно заключить, что снижение L_{AK} приводит к уменьшению крутизны S , а следовательно к повышению рабочего давления.

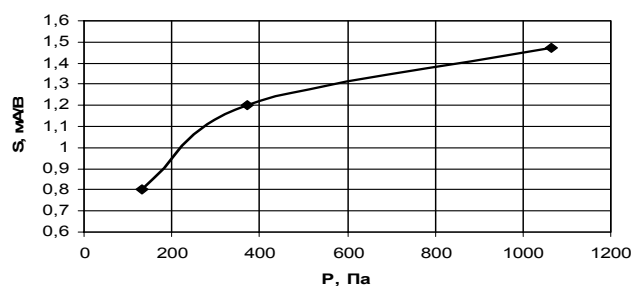


Рисунок 7 - Зависимость крутизны S импульсных вольт-амперных характеристик ЭПП-6 от давления P гелия

Проводились исследования вольт-амперных характеристик ЭПП-6 в непрерывном режиме. На рис.9 приведены экспериментальные зависимости

$I_n = f(U_n)$, измеренные при различных $P=const$ гелия и $L_{AK} = 1\text{мм}$, $d_A=8\text{мм}$. построены в двойном логарифмическом масштабе, а на рис.10 – изменение крутизны S .

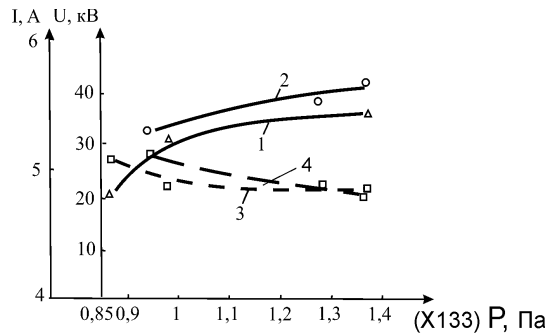


Рисунок 8 - Семейство экспериментальных характеристик ЭПП-6 в импульсном режиме работы зависимости ускоряющего напряжения U_u и тока I_u от давления P и междуэлектродного расстояния L_{AK} , где кривая 1 описывает $I_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 2\text{мм}$; 2- $I_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 4\text{мм}$; 3- $U_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 2\text{мм}$; 4- $U_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 4\text{мм}$.

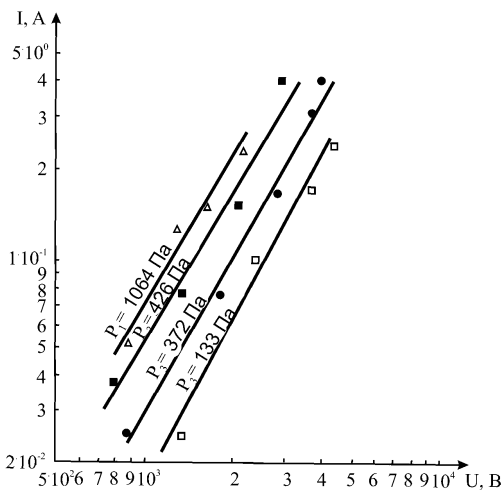


Рисунок 9 - Экспериментальные вольт – амперные характеристики ЭПП-6 в непрерывном режиме

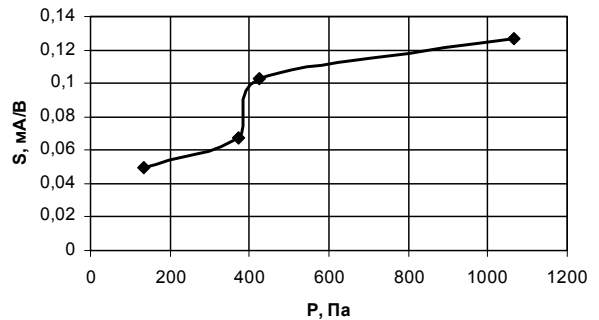


Рисунок 10 - Изменение крутизны S вольт-амперных характеристик ЭПП-6 в непрерывном режиме

Как показано на рис.6 повышение давления приводит к росту крутизны S вольт-амперных характеристик ЭПП-6 или уменьшению динамического сопротивления ЭПП $R_d = \Delta U / \Delta I$. Статическое сопротивление ЭПП-6 $R_{CT} = U / I$ с ростом давления также уменьшается. Однако величина крутизны S в непрерывном режиме на один два порядка ниже, чем в импульсном режиме. Это связано с большими токами электронного пучка, получаемыми при работе ЭПП в импульсном режиме.

Экспериментальная вольт-амперная характеристика высоковольтной ЭГП-14 (рис.11) измерены при поддуве гелия; $\tau_u \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ c}$; $f_c \leq 200 \text{ Гц}$; $P_{cp} \approx 10^3 \text{ Вт}$; $P_u \leq 10^6 \text{ Вт}$.

При работе ЭГП-14 наблюдается рост крутизны вольт-амперной характеристики с ростом давления. Повышение ускоряющего напряжения снижает расхождение поперечного сечения электронного пучка и увеличивает длину его пробега, обеспечивая тем самым увеличение длины диагностируемой области газового потока.

Благодаря работе в низком вакууме созданные ЭГП-6 и ЭГП-14 позволяют значительно упростить диагностическое оборудование при проведении аэродинамических экспериментов, так обеспечивают вывод электронного пучка в рабочую среду без использования различных методов создания перепада давлений, например дифференциальной откачки.

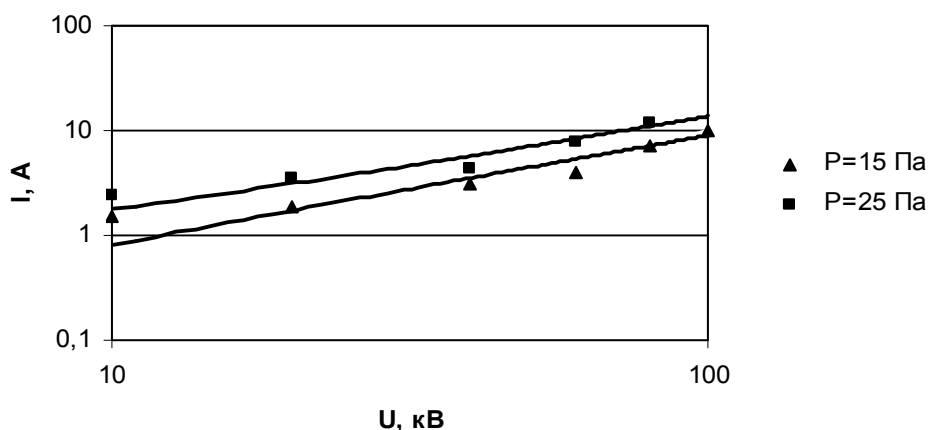


Рисунок 11 - Экспериментальные вольт-амперные характеристики высоковольтной газоразрядной электронной пушки ЭГП-14 в импульсном режиме

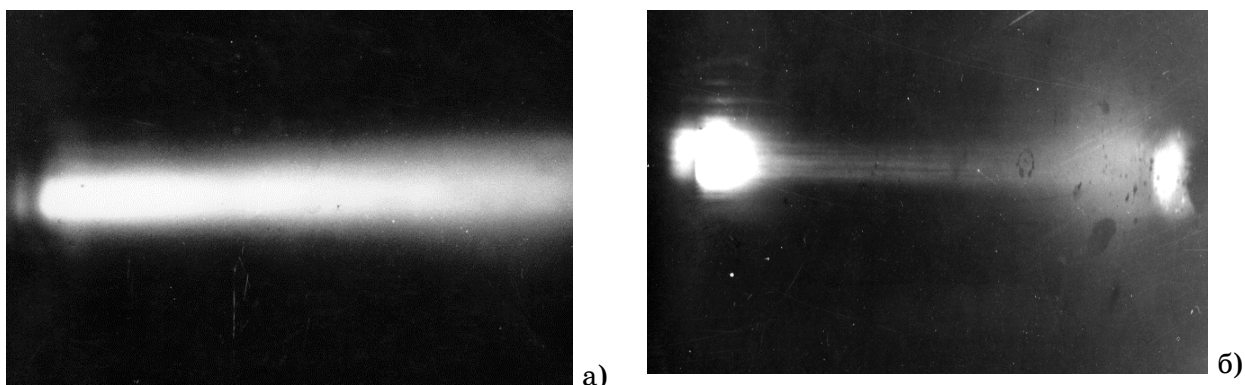


Рисунок 12 - Фотографии траектории электронного пучка

На рис.12 приведены фотографии траекторий электронного пучка в воздухе при давлении 133 Па. На рис.12а распределение плотности газа равномерное, а на рис. 12б - неравномерное. Изменение интенсивности свечения позволяет оценивать изменение плотности газовых потоков.

Свечение газа связано с неупругими взаимодействиями электронов пучка с молекулами и атомами остаточного газа, результатом которого является их возбуждение или ионизация, что приводит к излучению квантов электромагнитного излучения, используемого при диагностике.

6. Выводы

На основании исследований вольт-амперных характеристик при различных конструктивных параметрах газоразрядных электронных пушек с полым анодом и холодным катодом обнаружены закономерности влияющие на повышение рабочего давления. Это позволило создать газоразрядные электронные пушки ЭПП-6 и ЭПП-14 для визуализации сложных газовых течений в диапазоне давлений ниже $P < 1200 \text{ Па}$, при ускоряющих напряжениях $U_u < 100 \text{ кВ}$. Максимальная мощность инжектируемого электронного пучка в импульсе составляла $N_u \leq 10^6 \text{ Вт}$.

Созданные ЭПП представляют также практический интерес для реализации различных низковакуумных электронно-лучевых технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелов В.А., Данилович А.И. О газодинамическом методе генерации мощных импульсных электронных пучков и возможности использования их в газодинамическом эксперименте. Ученые записки ЦАГИ, т.7, №3, 1976, с.55 – 64.
2. Данилевич А.И., Горелов В.А. Исследование генерации электронных пучков в высоковольтном импульсном разряде. Письма в ЖТФ, т.5, вып. 2, 1979, с.83-86.
3. Павлов С.И. Применение электронных пучков для измерений .- М.: Энергия , 1972 .- 102 с.
4. Циглер С.А., Берд Л.Л., Олсон К.Х., Халл Д.А., Мориэл Д.А. Исследование распределения плотности в разреженных газах методом зондирования электронных пучков, Приборы для научных исследований, 1964, №4, с.23-31.
5. Hurlbut F.C. Elektron beam density probe for measurements in rarefied gas flows, Journ. Apple. Phys., 1959, v/30, №3, p.273-277.
6. Нестерихин Ю.Е., Солоухин Р.И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М. Наука, 1971 , 239 с.
7. Тутык В.А. Электронная газоразрядная пушка для низко вакуумных технологических процессов. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении (Том 2) (Сборник докладов 7-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов»).- Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2006.- с.76-80.
8. В.А.Чернов В.А, Завадская В.И. Экспериментальное исследование газодинамических характеристик электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда. Proceeding III international conferens on electron beam technologies, Varna, Bulgaria, 1991, p.166/