

УДК 537.525

На правах рукописи



Островерхов Евгений Владимирович

**ГЕНЕРАТОР ПРОТЯЖЁННЫХ ОБЪЁМНО-ОДНОРОДНЫХ
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
ДЛЯ АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ**

2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Научный руководитель: **Денисов Владимир Викторович**,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией пучково-плазменной инженерии
поверхности ИСЭ СО РАН

Официальные оппоненты:

Сайфутдинов Алмаз Ильгизович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
(КНИТУ – КАИ), профессор кафедры общей
физики, г. Казань

Телех Виктор Дмитриевич
кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», доцент кафедры «Плазменные
энергетические установки» (Э-8), г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теплофизики им.
С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «17» января 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.1.115.02 (Д 003.031.01) при Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной
электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) по
адресу: 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на
официальном сайте Института:

<https://hcei.tsc.ru/ru/obrazovanie/dissertations/ostroverkhov.html>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук



Г. Е. Озур

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ионно-плазменные методы обработки поверхности металлов и сплавов (очистка и активация, оксидирование, цементация, азотирование, нанесение износостойких покрытий и пр.) широко применяются в современной промышленности. Ионно-плазменное азотирование поверхности крупногабаритных изделий из металлов и сплавов в вакууме благодаря высокой экологичности, более перспективно по сравнению с азотированием в расплавах солей, карбонитрированием и азотированием в газовых печах. В плазме классического аномального тлеющего разряда, наиболее широко применяемого в промышленности, при относительно высоких давлениях рабочего газа (100–1000 Па) энергия ионов, бомбардирующих обрабатываемое изделие, весьма мала и составляет несколько десятков электронвольт, что снижает технологические возможности азотирования изделий. Переход в область рабочих давлений ≈ 1 Па и ниже позволяет регулировать энергию бомбардирующих ионов, которая пропорциональна величине прикатодного падения потенциала и может составлять несколько сотен электронвольт. Однако создание плазменных систем на основе разрядов низкого давления, в которых возможна обработка крупногабаритных протяженных изделий, имеет ряд сложностей. В частности, должны быть решены вопросы обеспечения низкой степени неоднородности распределения заряженных частиц по объему рабочей камеры, с возможностью независимой регулировки напряжения и тока разряда, что необходимо для равномерной обработки поверхности образцов и изделий. Этим требованиям удовлетворяют плазменные системы на основе несамостоятельного (с инъекцией электронов) тлеющего разряда низкого давления с полым катодом, обладающие низкой степенью неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях (ППО). Под ППО понимается плазменное образование, основные свойства (степень неоднородности распределения заряженных частиц, степень ионизации, состав плазмы и др.) и параметры которого (температура и концентрация заряженных частиц, потенциал плазмы), в основном определяются параметрами пучка инжектированных заряженных частиц (плотность тока, полная величина тока инъекции, кинетическая энергия частиц и проч.) с учетом, что созданы условия для максимально возможного расходования энергии инжектированных частиц на создание и поддержание данного плазменного образования. Необходимо отметить, что ранее были предложены разные способы снижения неоднородности концентрации заряженных частиц в ППО, в частности за счет независимой регулировки тока и напряжения горения тлеющего разряда, давления рабочего газа в вакуумной камере, а также за счет использования импульсно-периодического режима горения несамостоятельного тлеющего разряда с повышенной амплитудой тока разряда по сравнению со значением тока в стационарном режиме горения. Известным способом уменьшения степени неоднородности распределения концентрации плазмы в объеме полого катода несамостоятельного тлеющего разряда является использование двух и более инжекторов электронов.

Применение нескольких источников электронов позволяет снизить неоднородность, однако к настоящему времени остается непроработанным вопрос, каким образом можно спрогнозировать результирующее распределение концентрации заряженных частиц в системе с несколькими инжекторами электронов, и соблюдается ли принцип суперпозиции в такой разрядной системе и получаемых значениях параметров плазмы. В данной работе исследуется возможность применения принципа суперпозиции для прогнозирования распределения концентрации заряженных частиц в полном катоде сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с двумя инжекторами электронов. Кроме того, в работе предложено и исследовано перспективное техническое решение по использованию цилиндрического протяженного сетчатого плазменного эмиттера электронов, формирующего радиально-расходящийся пучок электронов, инжектируемых в ППО основного тлеющего разряда. Таким образом, дальнейшее развитие методов генерирования пучково-плазменных образований (ППО) большого объема ($> 0,1 \text{ м}^3$) в газовых разрядах низкого давления, способов получения низкой степени неоднородности распределения концентрации плазмы, а также прогнозирования свойств таких ППО и их применения для азотирования сталей, представляется актуальным.

Цель работы: разработка и исследование эффективных методов снижения степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в ППО, генерируемых в сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде при низком давлении рабочего газа и используемых для азотирования сталей.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих **задач:**

1. Выявление закономерностей генерации ППО в полном катоде несамостоятельного сильноточного тлеющего разряда низкого давления с двумя инжекторами электронов и проверка соблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц в ППО, полученных в полном катоде тлеющего разряда при раздельной работе инжекторов электронов, при токах тлеющего разряда до 200 А.

2. Выявление закономерностей генерации ППО в системе на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и протяженным цилиндрическим полым сетчатым эмиттером, создающим радиально расходящийся пучок электронов, инжектируемых в полый катод тлеющего разряда.

3. Разработка и создание генератора протяженных ППО с двумя инжекторами электронов для практической реализации ионно-плазменного азотирования крупногабаритных протяженных изделий из металлов и сплавов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Определены условия применимости принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц, полученных при раздельной работе двух источников электронов при впрыске из них электронов в плазменное образование тлеющего разряда.

2. Выявлены зависимости степени неоднородности продольного распределения концентрации плазмы в протяженном полом сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда от его диаметра, давления рабочего газа, напряжения горения тлеющего разряда при инъекции внутрь полого анода радиально сходящегося потока ионов из плазменного образования, формируемого основным сильноточным тлеющим разрядом с полым катодом.

Практическая значимость работы

1. Разработан и создан генератор объемно-однородных пучково-плазменных образований с объемом полого катода $0,34 \text{ м}^3$, используемый на практике для ионно-плазменного азотирования изделий из конструкционных и инструментальных сталей, выпускаемых промышленностью.

2. Выявлены закономерности низкотемпературного азотирования конструкционных и инструментальных сталей (08X18H10, 4X5MФС, X12MФ, 40X, 38X2MЮА), которые позволили разработать технологические режимы ионно-плазменного азотирования ряда изделий.

3. Предложен и опробован способ упрочнения поверхностных слоёв тонкостенных, толщиной около 100 мкм, протяженных (до 300 мм) трубок диаметром около 0,5 мм из нержавеющей стали для изготовления игл медицинских катетеров с целью снижения величины прогиба готовых игл. Величина прогиба трубок после азотирования в оптимальном режиме обработки снизилась на 20% по сравнению с исходным образцом.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласием расчетных и экспериментально полученных результатов, а также практической реализацией выводов, сформулированных в диссертации.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В генераторах объемно-однородных пучково-плазменных образований, формируемых в полом катоде сильноточного 1–200 А тлеющего разряда низкого (около 1 Па) давления, поддерживаемого внешней инъекцией электронов из двух источников, при увеличении тока тлеющего разряда и, соответственно, концентрации заряженных частиц, степень несоблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации плазмы возрастает, что необходимо учитывать при прогнозировании результирующего распределения концентрации заряженных частиц.

2. Увеличение диаметра полого протяженного (длиной $\approx 1 \text{ м}$) цилиндрического сетчатого анода вспомогательного дугового разряда (эмиттера электронов) приводит к снижению степени неоднородности продольного распределения концентрации заряженных частиц внутри него благодаря перераспределению плазмы, формируемой электронами дугового разряда и ионами из пучково-плазменного образования тлеющего разряда.

3. Созданный генератор протяженных пучково-плазменных образований позволяет в постоянном и импульсно-периодическом режимах в полом катоде объемом $0,34 \text{ м}^3$ в диапазоне давлений (0,2–1) Па при токах разряда до 350 А и

напряжениях горения до 300 В при средней мощности в разряде до 25 кВт создавать плазму с концентрацией около 10^{18} м^{-3} с продольной степенью неоднородности концентрации заряженных частиц не более $\pm 25\%$ для азотирования изделий из конструкционных и инструментальных сталей высотой до 800 мм, диаметром до 350 мм и массой до 150 кг.

4. Объемно-однородные пучково-плазменные образования, генерируемые в импульсно-периодическом режиме горения сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении, обеспечивают низкотемпературное (до 430 °С) азотирование протяженных (длиной до 300 мм) тонкостенных трубок из нержавеющей стали 08X18H10 на глубину до нескольких микрометров с низкой степенью неоднородности глубины азотированного слоя по длине изделий.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. По результатам работы получен 1 патент РФ на изобретение.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 25-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2018); XXIV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ – 24), (г. Томск); XII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (г. Казань, 2020); 15-я Международная научная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ – 2023 г.), (г. Минск, Беларусь); I Всероссийская конференция с международным участием «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (GDP NANO), (г. Казань, 2020); International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP-2017, г. Новосибирск), GDP-2019 (г. Томск), GDP-2021 (г. Екатеринбург), GDPA-2023 (г. Уфа); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2018, г. Томск), EFRE-2020 (г. Томск).

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие научную новизну, практическую ценность и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Автором разработаны и апробированы конструкции отдельных узлов генератора плазмы, собрана и введена в эксплуатацию экспериментальная установка с двумя инжекторами электронов, а также генератор с протяженным полым сетчатым эмиттером радиально расходящегося потока электронов. Все эксперименты и анализ полученных в ходе экспериментов результатов проводились автором лично. В постановке задач исследований и обсуждении полученных результатов активное участие принимали научный руководитель кандидат технических наук В.В. Денисов, а также доктор технических наук Н.Н. Коваль, доктор физ.-мат. наук Т.В. Коваль и С.С. Ковальский.

Структура и краткий обзор работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа имеет общий объем 123 страницы и содержит 74 иллюстрации, 21 таблицу, список литературы из 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведена структура диссертации и выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена обзору литературы по проблематике создания однородной по концентрации плазмы в больших вакуумных объемах. Рассмотрен ряд электродных систем, которые применялись в различных электрофизических установках для широкого спектра задач. Приведены также результаты численного моделирования систем на основе тлеющего разряда с полым катодом, полученные различными исследователями. В завершение главы делается вывод о перспективности использования несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом для генерации однородной плазмы в больших вакуумных объемах, а также о форме и конфигурации электродной системы.

Во второй главе описывается разработанный генератор плазмы на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом большой площади с впрыском электронов из двух инжекторов при низком давлении рабочего газа. Приводятся результаты исследования данной системы, описываются особенности формирования объёмно-однородной плазмы сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления.

В разделе 2.1 представлено описание экспериментальной установки, оборудования и методик, которые использовались при исследовании несамостоятельного тлеющего разряда. Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Вакуумная камера была изготовлена в виде полого цилиндра диаметром 600 мм, высотой 1200 мм и объемом 0,34 м³. Основной несамостоятельный тлеющий разряд зажигался между полым катодом, роль которого выполняли стенки вакуумной камеры, и анодом, состоящим из двух колец. Для стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда использовались источники (инжекторы) электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом. Вспомогательный дуговой разряд в каждом из инжекторов электронов зажигался пробоем по поверхности диэлектрика между полым катодом дугового разряда и конусным сетчатым электродом, который являлся анодом вспомогательного дугового разряда и находился под потенциалом камеры. Электроны, эмитированные через конусный сетчатый электрод, осциллировали в полном катоде тлеющего разряда и производили ионизацию газа, обеспечивая зажигание и горение несамостоятельного тлеющего разряда.

Инжекторы электронов располагались соосно напротив друг друга на продольной оси вакуумной камеры. Ввиду особенностей конструкции

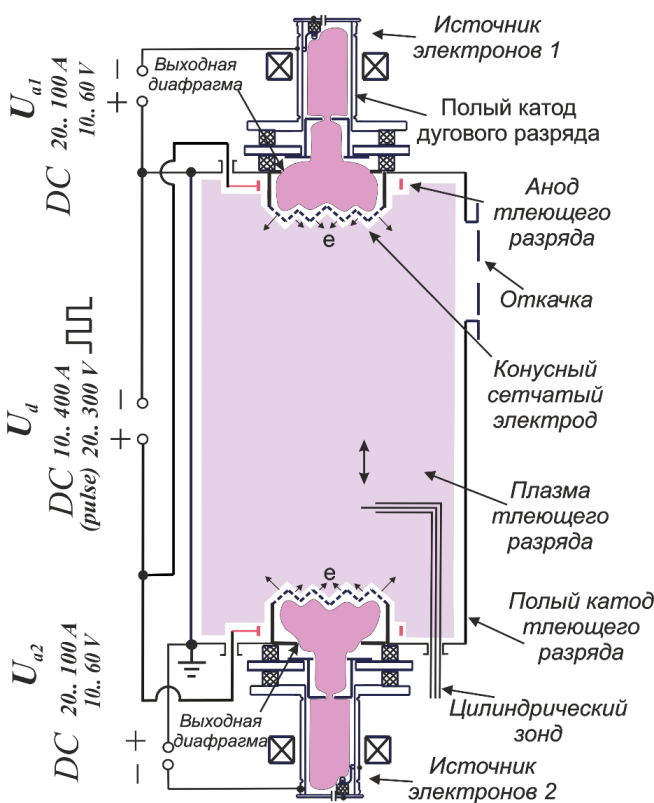


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд

вакуумной камеры и ее крепления к станине инжекторы электронов имели некоторую несимметричность. У выходной апертуры инжектора электронов 1 диаметр составлял 240 мм, а у выходной апертуры инжектора электронов 2 – 150 мм, что приводило к изменению условий инжекции электронов и неодинаковости распределений концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях, получаемых при отдельной работе инжекторов электронов.

В процессе исследований измерение тока тлеющего разряда осуществлялось с помощью датчика Холла CSNJ481, а измерение токов вспомогательных разрядов – датчиком Холла CSNR161 фирмы Honeywell, сигналы с которых подавались на

осциллограф Tektronix TDS2014C. Напряжение горения разряда измерялось с помощью осциллографического щупа 1:100. Для снижения степени неоднородности плазмы анод был разделен на две части, которые устанавливались симметрично относительно центра полого катода. Измерение концентрации плазмы проводилось с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра диаметром 0,8 мм и длиной 4,5 мм. Зонд перемещался вдоль продольной оси вакуумной камеры от инжектора электронов № 1 с шагом 200 мм поочередно на расстояниях $R = 0, 130$ и 260 мм от продольной оси вакуумной камеры.

Для сравнения распределений параметров плазмы (температуры электронов T_e , потенциала плазмы ϕ , концентрации заряженных частиц N), а также величины длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} , рассчитанной с использованием измеренных значений концентрации плазмы, вводились коэффициенты неоднородности k_{T_e} , k_ϕ , k_N , $k_{\lambda_{ei}}$ соответственно, равные максимальному отклонению величины от среднего значения, деленному на среднее значение этой величины:

$$k_n = \frac{|N_n - N_{cp}|_{\max}}{N_{cp}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где N_n – значение величины в n -й точке пространства с заданными координатами; $N_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение величины в заданных точках пространства.

Длина свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} оценивалась по известной формуле

$$\lambda_{ei} = \frac{1}{N\delta_c}, \quad (2)$$

где N – концентрация плазмы; δ_c – сечение кулоновского взаимодействия.

Исследования основных характеристик тлеющего разряда проводились в импульсно-периодическом квазистационарном режиме горения разряда. Поскольку длительность фронта разрядного импульса составляла для различных напряжений горения и мощности в разряде до 2 мс, то все характеристики разряда и измерения параметров плазмы проводились на третьей миллисекунде разрядного импульса при частоте следования импульсов $f = 38$ Гц с коэффициентом заполнения $\gamma = 13\%$. Перед началом эксперимента вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па. В экспериментах давление рабочего газа (азота) составляло 0,6 Па, напряжение горения несамостоятельного тлеющего разряда $U_d = 160$ В, токи вспомогательного дугового разряда $I_a = 20$ А и 45 А. При включении двух инжекторов электронов с токами 20 А ток несамостоятельного тлеющего разряда был равен 90 А, при включении двух инжекторов электронов с токами 45 А ток несамостоятельного тлеющего разряда составлял 200 А.

В разделе 2.2 представлены результаты зондовых измерений. Зондовые измерения продольных распределений параметров пучково-плазменных образований проводились в каждом эксперименте следующим образом. Сначала включался инжектор электронов № 1 (режим 1), измерялись ВАХ зонда в шести позициях – на расстояниях 0, 200, 400, 600, 800 и 1000 мм от инжектора электронов № 1, на основании которых в последующем строилось продольное распределение концентрации заряженных частиц N_e . Затем инжектор электронов № 1 выключали и включали инжектор электронов № 2 (режим 2), также проводилось измерение ВАХ зонда в тех же шести позициях. Затем оба инжектора электронов включали совместно (режим 3) и измеряли ВАХ зонда. Далее, после обработки зондовых характеристик и определения значений концентрации заряженных частиц, значения, полученные в одинаковых координатах при раздельной работе инжекторов электронов, складывались и получалось суммарное распределение концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании (режим 4). Эксперимент проводили для двух выбранных токов вспомогательного дугового разряда (20 А и 45 А). На рисунке 2 представлены распределения концентрации заряженных частиц в ППО, полученные при совместном включении инжекторов электронов № 1 и № 2 (рисунок 2,а), и суммарное распределение (рисунок 2,б) при токах дугового разряда 20 А.

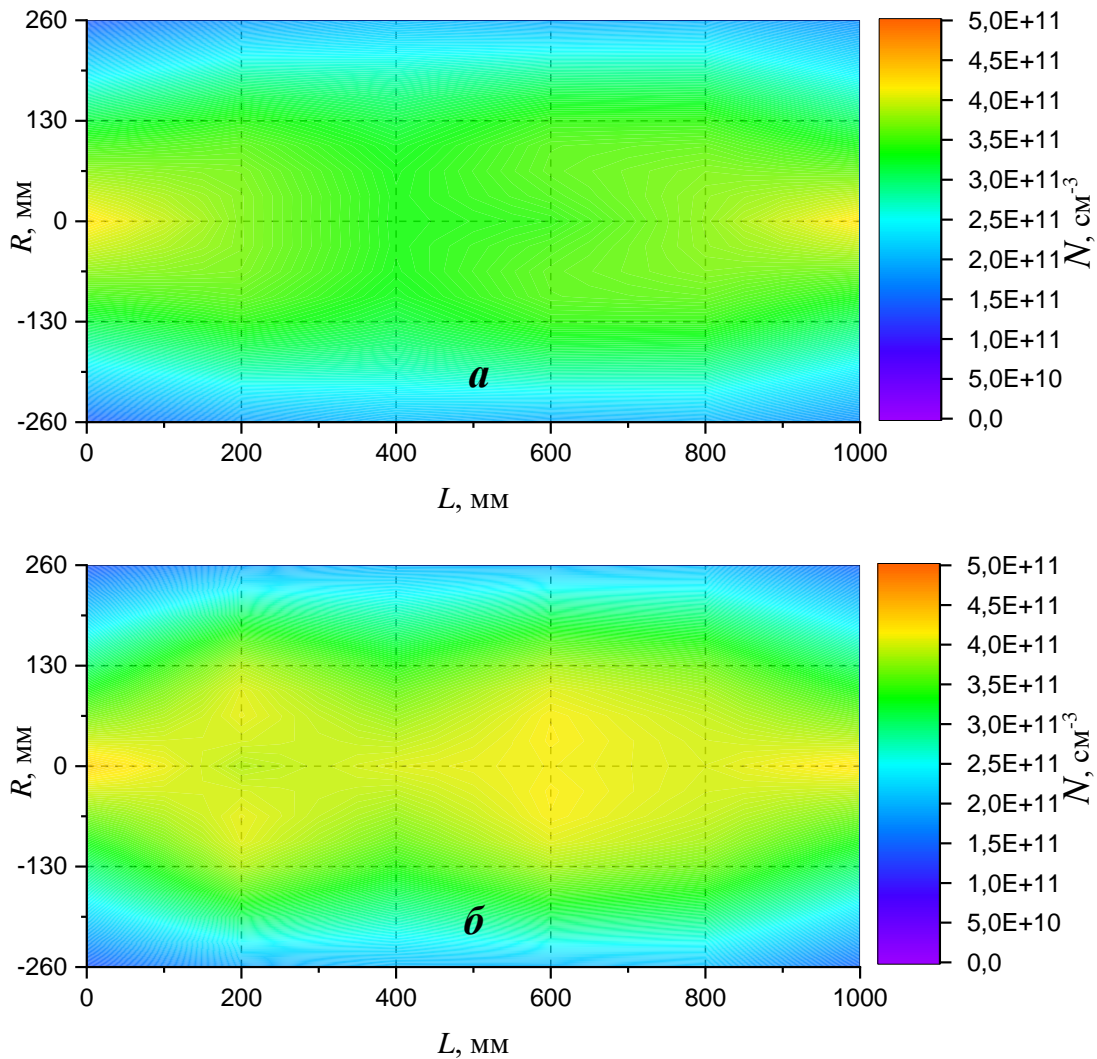


Рисунок 2 – Распределения концентрации заряженных частиц в ППО при токах дугового разряда 20 А: *a* – при совместном включении инжекторов электронов №1 и №2 (режим 3); *б* – суммарное распределение (режим 4)

Максимальное численное отклонение значений концентраций плазмы для режимов 3 и 4 составляет около 20% и наблюдается на продольной оси полого катода. Принцип суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц в продольном направлении выполняется с точностью не хуже 8%. Максимальное отклонение наблюдается на оси полого катода тлеющего разряда. На рисунке 3 представлены распределения концентрации заряженных частиц при токах дугового разряда 45 А.

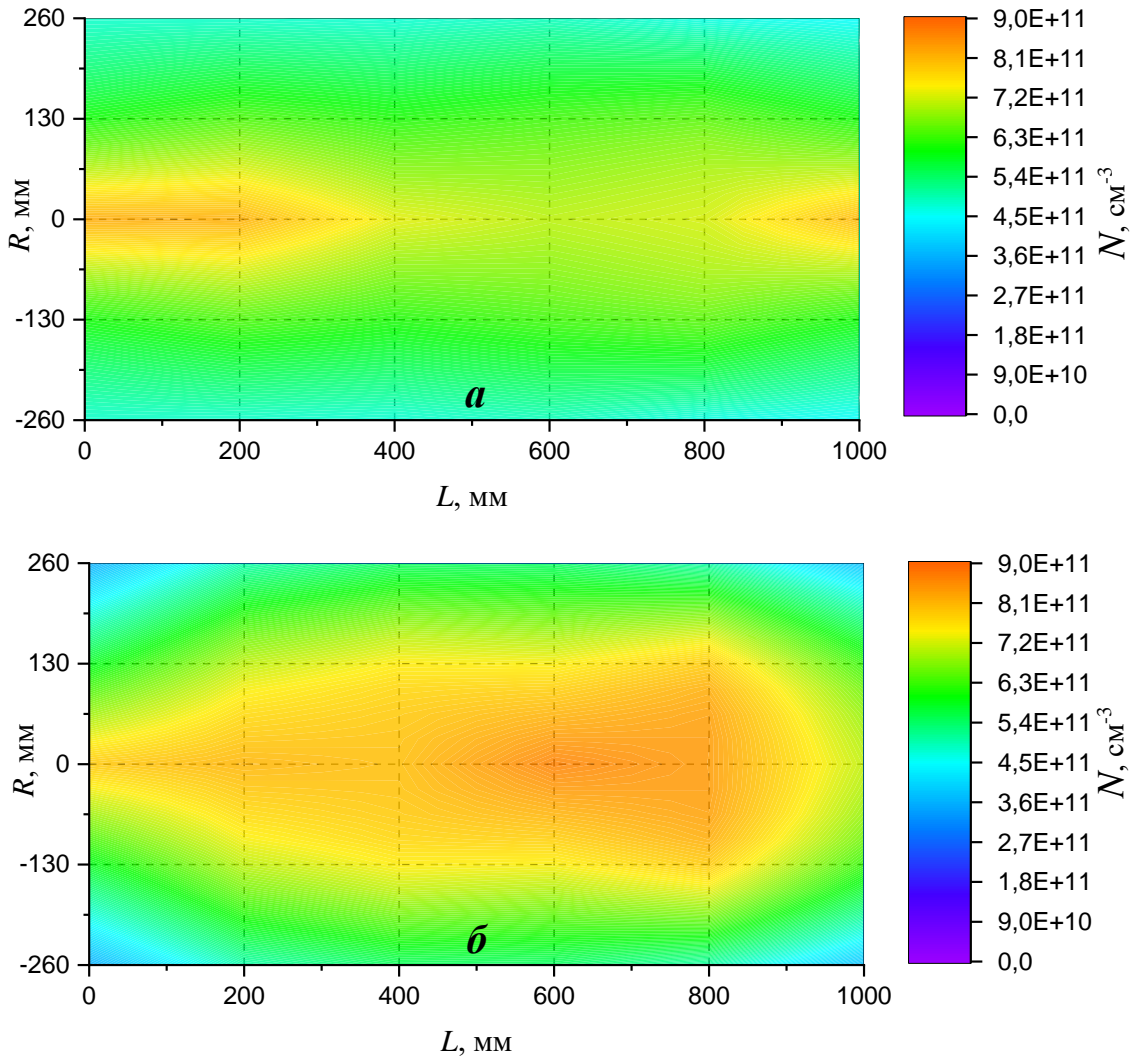


Рисунок 3 – Распределения концентрации заряженных частиц в ППО при токах дугового разряда 45 А: *а* – при совместном включении инжекторов электронов №1 и №2 (режим 7); *б* – суммарное распределение (режим 8)

Максимальное отклонение значений концентрации заряженных частиц для режимов 7 и 8 составляет около 26 % и наблюдается в области геометрической тени для инжектируемых электронов. При включении двух инжекторов электронов с токами вспомогательного дугового разряда 45 А разница между суммарным распределением концентрации плазмы в продольном направлении (режим 8) и экспериментальным (режим 7) в продольном направлении увеличивается по сравнению со случаем включения двух источников электронов с токами дугового разряда 20 А (режим 4 и режим 3 соответственно) и составляет 22 %.

Дополнительные исследования показали, что при увеличении тока вспомогательного дугового разряда с 20 до 45 А и концентрации плазмы примерно в 2 раза, с $\approx 3,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $\approx 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$; распределение потенциала плазмы становится более неоднородным.

В среднем градиент потенциала плазмы, наблюдаемый в основном в поперечном направлении и в меньшей степени в продольном для режима 3, составляет примерно 0,7 В, а для режима 7 – 1,4 В. Поперечный градиент

потенциала плазмы приводит к направленному движению низкоэнергетических электронов в сторону увеличения потенциала, увеличивая подвижность и коэффициент диффузии электронов как в поперечном, так и, в некоторой степени, в продольном направлении.

В дополнение к полученным результатам для определения роли повышенного значения концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании были построены карты распределения длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями. На рисунке 4 представлены распределения длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями при токах дугового разряда 20 А и 45 А (режим 3 и режим 7 соответственно).

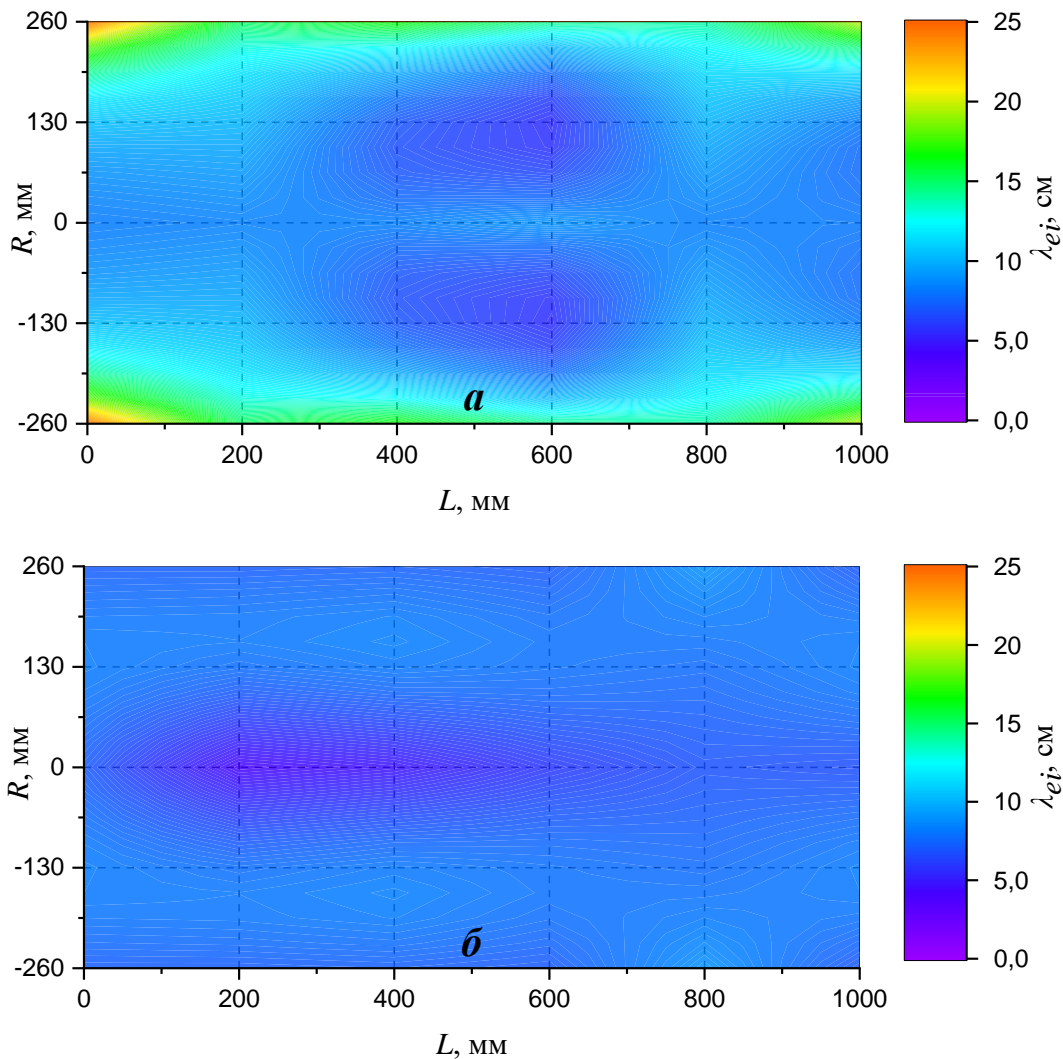


Рисунок 4 – Распределения длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями: *a* – при токах дугового разряда 20 А; *б* – при токах дугового разряда 45 А

При сравнении двух распределений видно, что длина свободного пробега электрона между кулоновскими (электрон-электронными и электрон-ионными столкновениями) взаимодействиями при токах дугового разряда 45 А существенно ниже и мало изменяется по объёму полого катода. Уменьшение длины свободного пробега между кулоновскими взаимодействиями приводит к

более частому изменению траектории движения заряженных частиц и, как следствие, к снижению степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в полном катоде тлеющего разряда.

В третьей главе представлен оригинальный генератор газовых ППО на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с инъекцией электронов из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера.

В разделе 3.1 приводится описание экспериментальной установки. Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 5. Также как и плазмогенератор, описанный в главе 2, генератор ППО собран на базе цилиндрической вакуумной камеры высотой 1200 мм, диаметром 600 мм и объёмом около 0,34 м³.

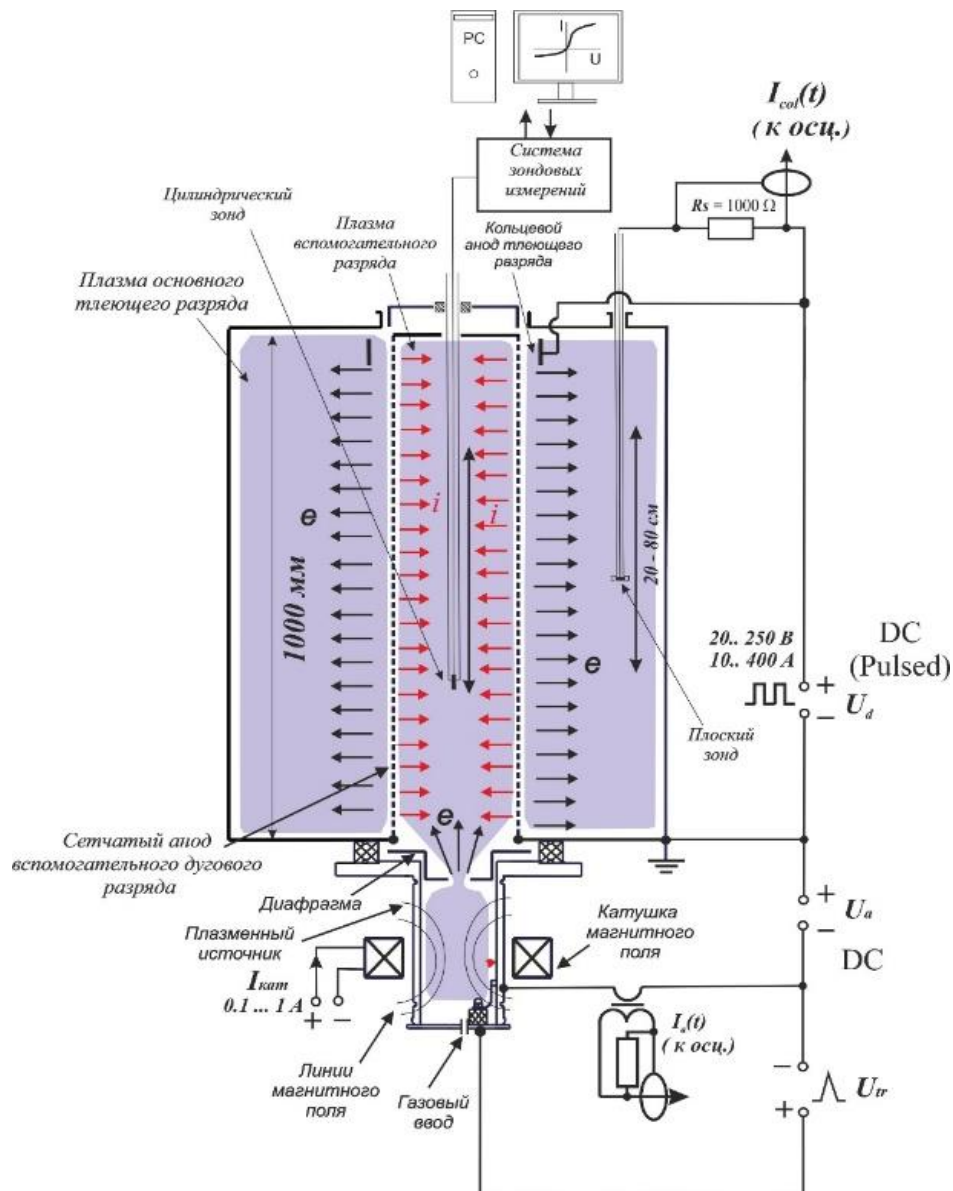


Рисунок 5 – Схема экспериментального стенда для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде

Для генерации вспомогательной плазмы, из которой извлекались электроны, инжектируемые в основной тлеющий разряд, использовался дуговой разряд с холодным полым катодом и протяжённым (около 1 м длиной)

полым сетчатым цилиндрическим анодом. При этом электроды инициирования дугового разряда располагались только на нижнем основании камеры. Использование одной дуговой ячейки обусловлено отсутствием на большинстве вакуумных ионно-плазменных установок посадочного места для второй дуговой ячейки. Разработка и реализация конструктивных и схемных решений по внедрению второго плазмодгенератора без отведенного для него посадочного места на вакуумной камере влечет за собой ряд технологических сложностей, что значительно увеличивает затраты на изготовление и последующую эксплуатацию установок.

Вспомогательный дуговой разряд инициировался пробоем по поверхности диэлектрика и горел между полым катодом дугового разряда и полым сетчатым анодом, который находился под потенциалом полого катода основного тлеющего разряда. Часть радиально расходящегося потока электронов, эмитируемых из плазмы дугового разряда, попадала сквозь сетку в область прикатодного падения потенциала тлеющего разряда, ускорялась в нем и осциллировала в полном катоде, генерируя плазму. В эксперименте использовались полые цилиндрические аноды двух диаметров: 115 и 200 мм. Для исследования распределения параметров вспомогательной плазмы вдоль оси цилиндрического сетчатого анода дугового разряда использовался цилиндрический зонд Ленгмюра.

Раздел 3.2 посвящен описанию результатов исследования распределений концентрации плазмы вспомогательного разряда в полном цилиндрическом аноде. На рисунке 6 представлены распределения плотности ионного тока вдоль полого анода для двух диаметров анода 115 и 200 мм при давлениях азота 0,15, 0,3 и 0,6 Па, при токе вспомогательного дугового разряда $I_d = 50$ А.

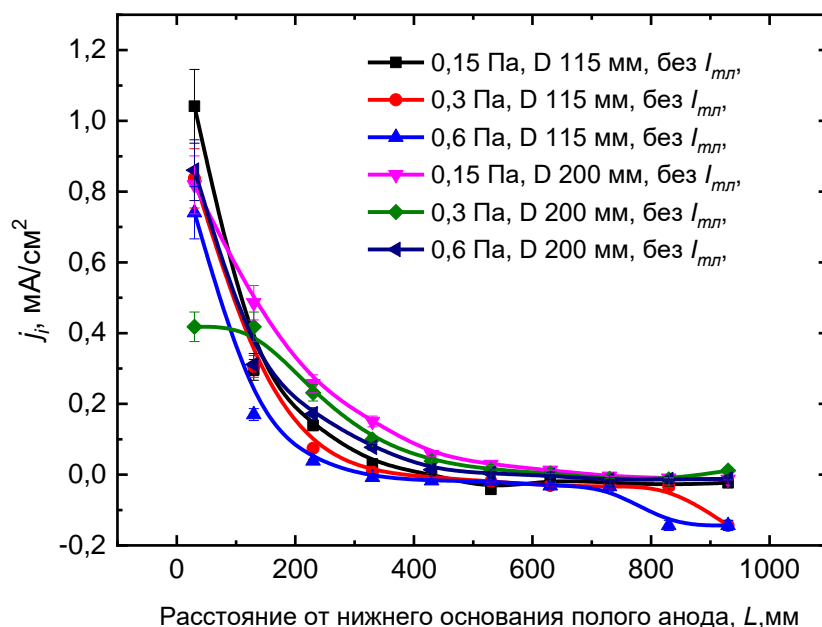


Рисунок 6 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере азота (0 – плоскость нижнего основания полого катода) без тлеющего разряда, $I_d = 50$ А

В отсутствие основного тлеющего разряда распределение плотности ионного тока на зонд имеет резко неоднородный характер. Плотность плазмы на расстоянии 400 мм приближается к нулю. При зажигании тлеющего разряда с напряжением горения $U_{тл} = 150$ В (рисунок 7) плазма формируется на всем протяжении полого анода.

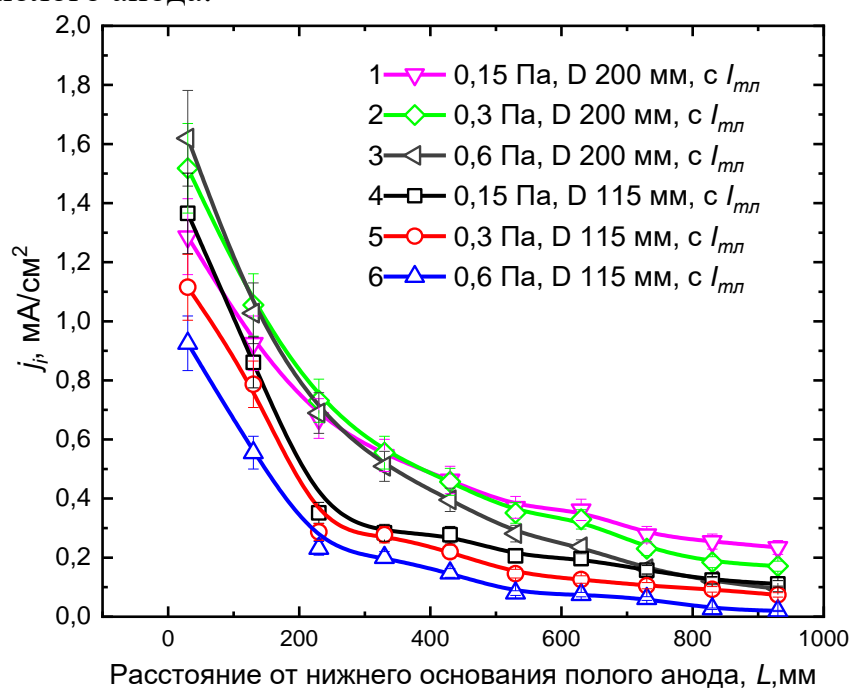


Рисунок 7 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере азота (0 – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом, $I_d = 50$ А, $U_{тл} = 150$ В

Увеличение диаметра полого анода со 115 мм до 200 мм позволяет на 40% снизить степень неоднородности распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда. В таблице 1 приведены коэффициенты неоднородности k_j для каждого распределения, представленного на рисунке 7.

Таблица 1

Номер распределения	1	2	3	4	5	6
k_j	140%	170%	215%	245%	245%	300%

Минимальная степень неоднородности продольного распределения плотности ионного тока при токе дугового разряда $I_d = 50$ А в среде азота достигается при диаметре полого цилиндрического анода 200 мм, давлении азота 0,15 Па и составляет 140%. На однородность распределения плотности ионного тока влияет также коэффициент заполнения импульса несамостоятельного тлеющего разряда γ , при его увеличении с 0,2 до 0,5 степень неоднородности снижается (рисунок 8).

Влияние коэффициента заполнения импульса на однородность распределения плотности ионного тока можно объяснить тем, что с его увеличением с 0,2 до 0,5 происходит наработка заряженных частиц в полем

катоде тлеющего разряда и повышается плотность потока ионов, инжектируемых из ППО тлеющего разряда в протяженный цилиндрический сетчатый анод.

В таблице 2 приведены коэффициенты для каждого распределения, представленного на рисунке 8.

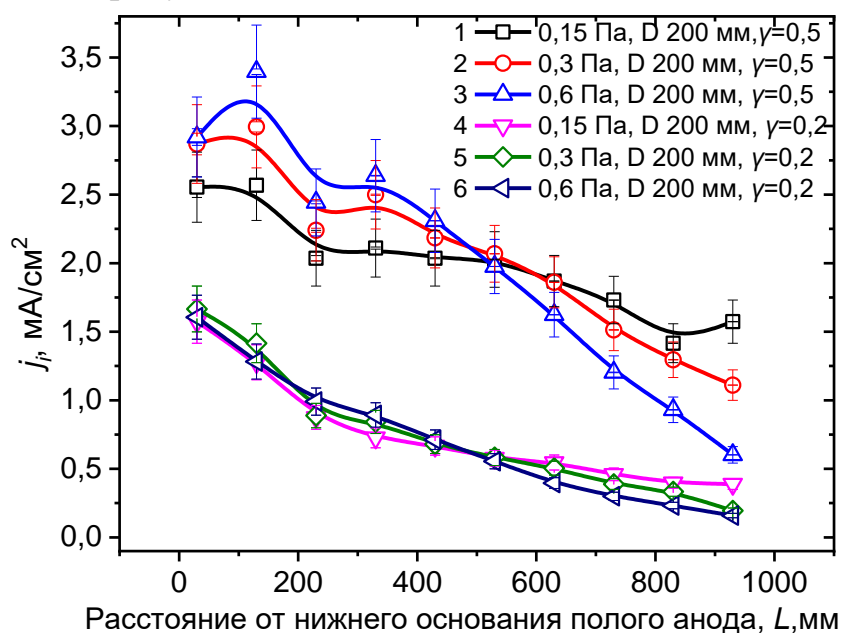


Рисунок 8 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сетчатого анода дугового разряда в атмосфере аргона (0 – плоскость нижнего основания полого катода), $I_d = 50$ А, $U_{пл} = 200$ В

Таблица 2

Номер распределения	1	2	3	4	5	6
k_j	30%	45%	70%	110%	120%	125%

Наименьший коэффициент неоднородности распределения плотности ионного тока вдоль полого сетчатого анода дугового разряда был получен при давлении 0,15 Па, коэффициенте заполнения разрядного импульса $\gamma = 0,5$ и составил 30 %. Для более детального рассмотрения влияния потока ионов на снижение степени неоднородности распределения плотности ионного тока на зонд в плазменном образовании в полом протяженном аноде проводилось численное моделирование процессов в полом сетчатом аноде с применением метода крупных частиц. На рисунке 9 представлена конфигурация аксиально-симметричной счетной области в различные моменты времени.

В модели используются 7 сортов ПИС-частиц: плазменные ПИС-электроны с температурой 5 эВ и ПИС-ионы; ПИС-ионы пучка с энергией ионов W , возникающие в процессе ионизации газа (азот); плазменные частицы ПИС-ионы и ПИС-электроны; ПИС-электроны внешнего источника и ПИС-электроны, возникающие за счет ионно-электронной эмиссии с границ расчетной области. В условиях эксперимента, в результате столкновений с атомами газа, ионы превращаются в быстрые нейтральные атомы (перезарядка). При давлении (0,15–0,6) Па концентрация атомов газа n_g составляет $(0,4–1,6) \cdot 10^{14}$ см⁻³. Средняя длина свободного пробега иона λ_i при перезарядке ионов аргона при

этих условиях равна (7–1,7) см. Родившиеся при перезарядке высокоэнергетические атомы аргона на аноде с бóльшим диаметром наиболее вероятно потратят свою энергию на генерацию плазмы. Так как газокинетическое сечение столкновений атомов аргона $\sigma_{\text{Ar}} = 4,02 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, средняя длина взаимодействия между атомами аргона при давлении 0,15 Па по оценкам равна около 6,25 см. Это подтверждает высокую вероятность большего количества взаимодействий атомов аргона при увеличении диаметра полого анода.

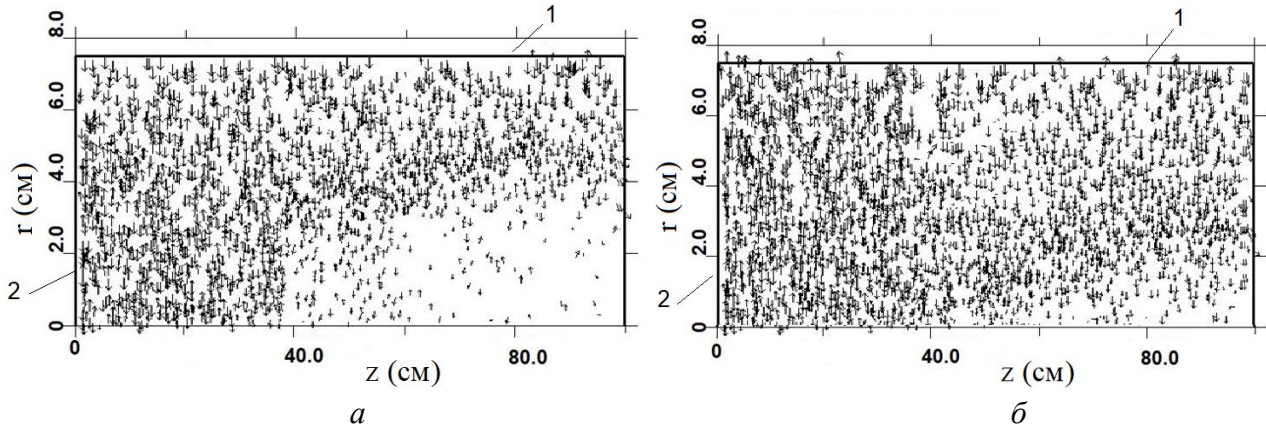


Рисунок 9 – Расчетная область цилиндрического полого анода и конфигурационный портрет векторов скоростей ионов: 1 – граница инжекции ионов; 2 – граница источника плазмы дугового разряда; $a - t = 3$ мкс; $b - t = 4$ мкс

С увеличением диаметра анода увеличивается также длина пути электронов, эмитируемых катодным пятном дугового разряда, до их ухода на анод. Благодаря этому увеличивается и длина дрейфа вдоль оси эмиттера электронов, компенсирующих объёмный заряд ионов, инжектируемых из плазмы тлеющего разряда, то есть плазма внутри полого анода перераспределяется. В совокупности, эти факторы уменьшают степень неоднородности концентрации плазмы в продольном направлении внутри полого сетчатого анода и, как следствие, повышают однородность плотности потока электронов в тлеющий разряд, а также снижают степень неоднородности концентрации заряженных частиц основного тлеющего разряда.

Четвертая глава посвящена описанию генератора объёмно-однородных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом для азотирования сталей.

В разделе 4.1 представлена блок-схема установки на основе созданного генератора объёмных ППО, позволяющая в непрерывном и импульсном режимах горения разряда в полном катоде объемом 0,34 м³ создавать пучково-плазменные образования с концентрацией заряженных частиц $\approx 5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ с неоднородностью не хуже $\pm 25\%$ от среднего значения. Генератор низкотемпературной плазмы предназначен для очистки, активации и азотирования поверхности изделий из конструкционных и инструментальных

сталей массой до 150 кг. В таблице 3 представлены параметры генератора газовых пучково-плазменных образований.

Таблица 3 – Параметры генератора газовых пучково-плазменных образований для обработки поверхности материалов и изделий

Объем газоразрядной камеры (без теплового экрана)	0,34 м ³
Среднее значение концентрации плазмы при токе разряда 100 А, напряжении горения 200 В, $p = 1$ Па	Не ниже $5 \cdot 10^{11}$ см ⁻³
Неоднородность распределения концентрации плазмы вдоль оси полого катода, относительно среднего значения	Не более ± 25 %
Плотность ионного тока при токе разряда 100А, напряжении 200В, $p = 1$ Па	Не ниже 4 мА/см ²
Рабочие газы	N ₂ , Ar, O ₂ , H ₂
Режим горения разряда	Постоянный, импульсный
Частота следования разрядных импульсов	1 Гц÷5 кГц
Коэффициент заполнения разрядных импульсов	(1÷100) %
Напряжение горения разряда	(50÷300) В
Ток разряда в постоянном режиме горения разряда	(20÷100) А
Максимальный ток в импульсном режиме горения	До 300 А
Максимальный средний ток, обеспечиваемый источником питания	100 А
Максимальная средняя мощность в разряде	25 кВт
Максимальная мощность, потребляемая источником питания разряда из сети	30 кВт
Размеры полезной области для загрузки деталей (с тепловым экраном)	(350×350×800) мм
Масса обрабатываемых деталей в одной загрузке	До 150 кг
Максимальная достигаемая температура деталей (с тепловыми экранами)	750 °С

В *разделе 4.2* представлены результаты исследования закономерностей азотирования штамповой стали 4ХМФС. Определялось влияние содержания азота в азот-аргоновой газовой смеси на свойства азотированного слоя при одном и том же давлении 1 Па для следующих значений содержания азота: 100 %, 50 %, 25 %, 10 % в ППО несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. Показано, что после азотирования в газовой смеси азота и аргона с соотношением N₂(10%)+Ar(90%) наблюдается наиболее низкий коэффициент трения и износа поверхности стали.

В *разделе 4.3* представлен список сталей разных марок, для которых разработаны технологические режимы ионно-плазменного азотирования в газовых ППО, формируемых несамостоятельным тлеющим разрядом низкого давления с полым катодом. На рисунке 10 приведен внешний вид внутреннего объема рабочей камеры установки с размещёнными деталями для азотирования в ППО несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Технологические режимы азотирования изделий могут быть рекомендованы к применению на предприятиях практически во всех отраслях отечественной промышленности, что подтверждается актами внедрения.



Рисунок 10 – Азотированные пуансоны из штамповых сталей в рабочей камере установки для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом

В разделе 4.4 приведены результаты низкотемпературного, менее $430\text{ }^{\circ}\text{C}$, азотирования тонкостенных трубочек длиной $\sim 500\text{ мм}$, диаметром 450 мкм , с толщиной стенки 100 мкм , используемых для изготовления игл медицинских катетеров. Задача состояла в увеличении жёсткости трубочки и обеспечении однородной обработки по ее длине. Толщина азотированного слоя составила $6,5\text{ мкм}$. Неоднородность твердости азотированного слоя на выбранной длине 300 мм составила 12% . Результаты испытаний отрезков азотированных трубочек (длиной 70 мм) на прогиб показывают, что величина прогиба трубочек снизилась на 20% по сравнению с исходным образцом. Неоднородность прогиба по выбранным образцам на длине 300 мм составила 5% , что также свидетельствует о низкой степени неоднородности глубины азотированного слоя по длине трубочек.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

К **основным результатам и выводам** работы можно отнести следующие:

1. В осесимметричной цилиндрической системе генерации пучково-плазменных образований на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с двумя инжекторами электронов, расположенными на торцах полого катода при повышении токов вспомогательного дугового разряда с 20 до 45 А в источниках электронов, точность выполнения принципа суперпозиции снижается, что связано с повышением концентрации заряженных частиц, поперечного градиента потенциала плазмы и, соответственно, коэффициента подвижности электронов в поперечном направлении в полым катодом, а также повышенным влиянием

кулоновских взаимодействий. В случае арифметического сложения распределений концентрации заряженных частиц, полученных при отдельной работе инжекторов электронов при относительно низких, до ≈ 100 А токах тлеющего разряда, учитываются свойства пучково-плазменных образований со значительно более низкой степенью ионизации. Это приводит к возрастанию рассогласования экспериментального и суммарного распределений при увеличении тока инъекции и, соответственно, тока тлеющего разряда, а также концентрации заряженных частиц.

2. Показано, что в системе генерации ППО на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с инъекцией электронов из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера (анода дугового разряда) длиной ≈ 1 м увеличение его диаметра со 115 мм до 200 мм способствует снижению неоднородности продольного распределения плотности ионного тока. Снижение давления газа с 0,6 Па до 0,15 Па также позволяет значительно (на 30–40 %) снизить продольную неоднородность концентрации плазмы в полой аноде. К снижению степени неоднородности приводит также увеличение напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом, благодаря увеличению ионного тока, инжектируемого внутрь полого сетчатого анода. Полученные результаты позволяют оптимизировать размеры анода, а также системы электропитания и управления пучково-плазменной системы.

3. Изготовлены и введены в эксплуатацию генератор ППО и установка на базе данного плазмогенератора с возможностью обработки изделий высотой до 800 мм, диаметром до 350 мм и весом до 150 кг. Конструкция и электропитание плазмогенератора позволяют независимо регулировать напряжение горения и ток основного несамостоятельного тлеющего разряда, а также энергию ионов, поступающих на поверхность обрабатываемой детали.

4. Разработаны технологические режимы обработки для ряда сталей: стали для горячего деформирования (4X5МФС и её аналоги); стали для холодного деформирования (X12МФ и её аналоги); конструкционных сталей (40X, 38X2МЮА и др.). Определены также основные технические возможности и сферы применения ионно-плазменного азотирования в азот-аргоновых ППО, формируемых в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления. Процесс азотирования промышленно выпускаемых пуансонов введен в производственный цикл ряда промышленных предприятий, что подтверждается актами внедрения результатов диссертационной работы.

5. Подобран режим азотирования тонкостенных трубочек для игл медицинских катетеров. Величина прогиба трубочек снизилась на 20% по сравнению с исходным образцом. Неоднородность величины прогиба по выбранным образцам на длине 300 мм составила 5%, что свидетельствует о равномерности глубины азотированного слоя по всей длине трубочки. Неоднородность твердости азотированного слоя на длине 300 мм составила 12%, что вполне удовлетворяет требованиям по применению таких трубочек в качестве заготовок для изготовления игл медицинских катетеров.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Influence of the anode of a non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode on the spatial distribution of plasma concentration / V. V. Denisov, N. N. Koval, **E. V. Ostroverkhov** [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No 7. – P. 1147–1153.

2. Low-temperature plasma source based on a cold hollow-cathode ARC with increased service life / V. V. Denisov, Y. K. Akhmadeev, N. N. Koval, **E. V. Ostroverkhov** // High Temperature Material Processes. – 2016. – Vol. 20, No 4. – P. 309–316.

3. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode / V. V. Denisov, **E. V. Ostroverkhov**, N. N. Koval [et al.] // Physics of Plasmas. – 2019. – Vol. 26, No 12. – P. 123510.

4. Non-Self-Sustained Hollow-Cathode Glow Discharge at Low Burning Voltages / V. V. Denisov, **E. V. Ostroverkhov**, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No 4. – P. 563–568.

5. Generation of Plasma with Increased Ionization Degree in a Pulsed High-Current Low-Pressure Hollow Cathode Discharge / V. V. Yakovlev, **E. V. Ostroverkhov**, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63, No 10. – P. 1757–1765.

6. Generation of homogeneous gas-discharge beam-plasma formations in an extended hollow-cathode of a high-current glow discharge / **E. V. Ostroverkhov**, V. V. Denisov, Yu. A. Denisova [et al.] // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, No 1. – P. 141–149.

7. Pulsed Non-self-sustained Arc Discharge In Extended Hollow Anode / S. S. Kovalsky, V. V. Denisov, **E. V. Ostroverkhov** [et al.] // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, No 1. – P. 150–155.

8. Electron-ion-plasma equipment for modification of the surface of materials and products / N. N. Koval, Y. K. Akhmadeev, **E. V. Ostroverkhov** [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, No S2. – P. S294–S300.

9. Extended Cylindrical Low-Pressure Arc Discharge Plasma Emitter for Generation of a Radially Diverging Electron Beam / S. S. Kovalsky, V. V. Denisov, N. N. Koval, **E. V. Ostroverkhov** // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63, No 10. – P. 1735–1742.

10. Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure / V. V. Denisov, Yu. A. Denisova, **E. V. Ostroverkhov** [et al.] // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, No 1. – P. 145–150.

Патенты:

1. Патент РФ № 2686975. Способ ионно-плазменного азотирования изделий из титана и титаносодержащих сплавов. Заявл. 26.03.2018, опубл. 06.05.2019 / Денисов В. В., Коваль Н. Н., Щанин П. М., **Островерхов Е. В.**, Денисова Ю. А., Иванов Ю. Ф., Ахмадеев Ю. Х., Лопатин И. В.