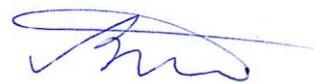


УДК 537.525

На правах рукописи



Денисов Владимир Викторович

**СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ
ОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНОГО
НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НИЗКОГО
ДАВЛЕНИЯ С ПОЛЫМ КАТОДОМ**

1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2024

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

Научный консультант: **Коваль Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Официальные оппоненты: **Семенов Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ

Закревский Дмитрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией мощных газовых лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «22» января 2025 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.03 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на официальном сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/flxxiylc>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, канд. техн. наук



А.В. Казаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Пучково-плазменные методы модификации поверхности материалов и изделий выделяет экологичность, значительное энерго- и ресурсосбережение, высокое качество модифицированной поверхности. Наибольшие перспективы для реализации данных методов связаны с использованием плазменных образований, генерируемых в разрядах низкого ($\lesssim 1$ Па) давления. Они позволяют гибко варьировать все основные параметры воздействия на материал или изделие, включая плотность ионного тока и энергию ионов, благодаря чему нашли применение как в научных исследованиях, так и в промышленности для генерации объемной газовой плазмы, используемой для очистки, активации поверхности изделий, их нагрева, а также диффузионного насыщения различными элементами (азотом, углеродом, бором и др.). Однако, несмотря на это, остаются вопросы, связанные с масштабированием электродных систем таких разрядов и получением в значительных, более долей кубического метра, вакуумных объемах необходимой пространственной однородности распределения концентрации плазмы. Несамостоятельный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом в стационарном, импульсном и частотно-импульсном режимах горения, благодаря возможности генерации плазмы с повышенными для тлеющих разрядов концентрациями плазмы в значительных вакуумных объемах и гибкого варьирования всеми основными рабочими параметрами процесса генерации плазмы, представляются весьма перспективным методом получения плотной плазмы для процессов диффузионного насыщения поверхности изделий активными атомами. До настоящей работы отсутствовали систематические исследования импульсных режимов горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого (≈ 1 Па) давления с полым катодом большой ($\geq 0,25$ м²) площади с получением высоких значений токов разряда (> 100 А) при относительно низких (100 – 200) В напряжениях горения разряда. То есть не была решена задача достижения в таком разряде плотностей ионного тока из плазмы величиной несколько десятков миллиампер на квадратный сантиметр и не получены данные о факторах, ограничивающих стабильное горение несамостоятельного тлеющего разряда в режимах горения с повышенной, до нескольких сотен киловатт, мощностью. Генерируемые в таких режимах горения разряда пучково-плазменные образования (здесь и далее ППО), исследуемые и описываемые в данной работе, являются плазменной средой, основные свойства и параметры которой определяются пучком частиц (электронов, ионов, фотонов, быстрых нейтральных частиц и др.), инжектируемых в электро-разрядную систему, обеспечивающую зажигание и горение разряда в определенном диапазоне рабочих параметров по давлению, току, напряжению горения. Ключевое влияние пучка инжектируемых заряженных частиц на свойства генерируемой плазменной среды в таких особых условиях отражена в понятии «пучково-плазменное образование», которое перспективно как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для технологических целей.

Результаты исследований и разработок специализированных систем генерации пучково-плазменных образований, позволяющих генерировать технологические плазменные образования при низком (около 1 Па) давлении с относительно высокой ($\geq 1\%$) степенью ионизации в большом ($>0,1$ м³) вакуумном объеме с достаточно низкой, не хуже 25 %, степенью неоднородности распределения плотности заряженных частиц, и эффективно их использовать для реализации технологий

пучково-плазменной модификации поверхности, практически не представлены в литературе и не доведены до прикладного применения. В связи с этим тематика диссертационной работы является **актуальной**.

Цель работы заключалась в создании систем генерации газовых объемно-однородных пучково-плазменных образований с высокой степенью ионизации в больших вакуумных объемах при низких давлениях, перспективных для реализации эффективных технологий упрочнения поверхности материалов и изделий.

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

1. Исследовать процессы зажигания и горения сильноточного, до нескольких сотен ампер, несамостоятельного тлеющего разряда с полыми катодами большого ($>0,1 \text{ м}^3$) объема, поддерживаемого внешней инжекцией пучка электронов.

2. Исследовать закономерности генерации газовых пучково-плазменных образований с концентрацией до 10^{12} см^{-3} с повышенной степенью ионизации плазмы в стационарном, импульсном и импульсно-периодическом режимах горения. Разработка и реализация способов снижения степени неоднородности концентрации пучково-плазменных образований.

3. Оптимизировать конфигурации и рабочие параметры электродных систем для обеспечения генерации пучково-плазменных образований с минимальной степенью неоднородности концентрации плазмы, а также высоких эксплуатационных характеристик оборудования для обработки поверхности материалов и изделий.

4. Разработать и создать прототипы нового класса технологических систем генерации объемно-однородных пучково-плазменных образований, формируемых при низком ($\lesssim 1 \text{ Па}$) давлении, обеспечивающих независимую регулировку всех основных рабочих параметров воздействия на обрабатываемую поверхность. Разработать технологические режимы упрочнения поверхности материалов и изделий из конструкционных и инструментальных материалов.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:

1. Предложен и реализован принцип и определены закономерности генерации газовых объемно-однородных пучково-плазменных образований со степенью ионизации до 15 % для несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом.

2. Определены условия устойчивого горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого, $<1 \text{ Па}$, давления с полыми катодами объемами более $0,1 \text{ м}^3$ при токах до 800 А, напряжениях горения 350 В, импульсной мощности около 300 кВт при токах инжекции электронов в катодную полость до 90 А. Показаны пути дальнейшего улучшения параметров таких разрядов.

3. В пучково-плазменных образованиях, генерируемых в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом при низком давлении, установлена важная роль кулоновских взаимодействий при токах в сотни ампер в снижении степени неоднородности концентрации заряженных частиц.

4. Продемонстрирована возможность получения в ППО, генерируемых в полом катоде сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда при давлении ($\approx 0,1 \text{ Па}$) в больших вакуумных объемах ($>0,1 \text{ м}^3$) плотностей электронного тока на цилиндрический зонд до 7 А/см^2 с низкой степенью неоднородности.

5. Разработана и апробирована методика расчета конфигурации и электрических параметров систем с полым катодом для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления.

6. Создан новый класс генераторов объемных пучково-плазменных образований с рекордными параметрами и показана возможность их эффективного использования в технологических процессах пучково-плазменной модификации материалов.

Научная значимость полученных результатов заключается в значительном вкладе в понимание основных физических процессов, влияющих на генерацию пучково-плазменных образований и являющихся научной основой создания нового класса генераторов объемно-однородных пучково-плазменных образований с рекордными параметрами и характеристиками.

Практическая значимость работы состоит в том, что научные положения и выводы стали основой для создания ряда систем генерации технологических ППО и ионно-плазменных установок для реализации технологических циклов упрочнения поверхности материалов и изделий, а также основой цикла фундаментальных и прикладных исследований свойств газовых и газо-металлических ППО, а также электронно-эмиссионных свойств ППО, проводимых в настоящее время.

Представленные в диссертации результаты исследований позволили внедрить ряд технологических режимов ионно-плазменного упрочнения поверхности изделий из конструкционных и инструментальных сталей, что подтверждено актами внедрения.

В ходе выполнения работы разработаны способы упрочнения материалов, на которые получены патенты.

Полученные результаты могут быть использованы в других электроразрядных системах для создания научного оборудования и реализации процессов ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий.

Исследования по диссертации выполнялись в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук в 2013-2020 годы (Пункт II.14), государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2019-0002 и № FWRM-2022-0001, а также проектов РНФ № 14-29-00091, РФФИ № 16-48-700079, № 16-58-00075, № 18-38-00836, № 19-08-00370А, гранта в форме субсидии по соглашению № 075-15-2021-1348 в рамках ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы. По результатам работ инициирован и выполнен ряд хозяйственных работ.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, их физической обоснованностью, большим объемом экспериментальных данных, полученных с помощью современных методов исследований плазменных образований и свойств поверхности материалов, систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и методик обработки данных. Результаты работы подтверждаются их воспроизводимостью, согласованностью экспериментально полученных результатов и результатов численных оценок и математического моделирования, а также успешной практической реализацией полученных выводов при использовании созданного ионно-плазменного оборудования в процессах модификации поверхности материалов и изделий.

Методология и методы исследования

Методологическую основу составили указанные в диссертации труды отечественных и зарубежных ученых, проводивших исследования и разработку систем генерации объемных плазменных образований в разрядах низкого давления.

В работе для определения влияния условий горения разряда на степень неоднородности концентрации заряженных частиц в полых катодах разработанных генераторов использовался экспериментальный зондовый метод измерения параметров пучково-плазменных образований. Для определения состава плазменных образований использовался метод эмиссионной спектроскопии.

С использованием экспериментальных методов и методов математического моделирования проведены исследования закономерностей генерации ППО в полых катодах большого ($0,2 - 0,3 \text{ м}^3$) объема, имеющих соотношение длины к диаметру 1:1 и 1:2 (протяженная геометрия).

Разработка генераторов технологических ППО произведена с использованием разработанной и апробированной в процессе исследований методики расчета конфигурации системы генерации пучково-плазменного образования и параметров систем электропитания для нее.

Для исследований результатов ионно-плазменной обработки поверхности конструкционных и инструментальных сталей, титана в ППО использованы экспериментальные методы металлографического анализа структуры металлов, рентгеноструктурного анализа, включая исследования с использованием синхротронного излучения, электронной просвечивающей и сканирующей микроскопии, а также трибологические методы.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Инжекция электронов с током до 100 А из плазмы дугового разряда через сетчатый электрод в катодную полость тлеющего разряда низкого давления ($0,025-1 \text{ Па}$) при выполнении условий сеточной стабилизации и формирование электронного пучка в катодном слое тлеющего разряда обеспечивают поддержание несамостоятельного тлеющего разряда с током до 800 А и стабильную генерацию плазмы с плотностью до $2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ в объеме $0,3 \text{ м}^3$ при уровне неоднородности плазмы $\approx 20\%$.

2. Увеличение концентрации заряженных частиц (с $1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и, соответственно, степени ионизации пучково-плазменных образований (с долей процента до 15 %) в сильноточном, до 800 А, несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом, поддерживаемым пучком инжектируемых электронов с током до 100 А, при низком ($0,025 - 1 \text{ Па}$) давлении, интенсифицирует кулоновские взаимодействия, что приводит к кратному снижению степени неоднородности плазмы в полном катоде объемом около $0,3 \text{ м}^3$.

3. В пучково-плазменных образованиях с концентрацией заряженных частиц $\approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и высокой степенью ионизации ($> 1\%$), генерируемых в сильноточном ($100 - 800 \text{ А}$) несамостоятельном тлеющем разряде низкого ($0,02 - 0,5 \text{ Па}$) давления с полым катодом ($> 0,1 \text{ м}^3$), распределения концентрации заряженных частиц, полученные при одновременной работе нескольких источников электронов, и распределения, полученные суммированием значений плотности при раздельной работе источников электронов, не отвечают принципу суперпозиции, что объясняется ростом влияния кулоновских взаимодействий на траектории движения заряженных частиц.

4. В системе генерации пучково-плазменных образований с инжекцией электронов через расположенный соосно с цилиндрическим полым катодом тлеющего разряда протяженный (1 м) цилиндрический сетчатый плазменный эмиттер электронов на основе дугового разряда, неоднородность распределения концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании снижается в результате

влияния встречных потоков ионов из плазмы тлеющего разряда на плазму дугового разряда и потока электронов из дугового разряда на плазму тлеющего разряда.

5. Использование импульсно-периодического режима генерации газового пучково-плазменного образования с изменяемой в широких пределах плотностью плазмы обеспечивает изменение толщины слоя катодного падения потенциала от долей миллиметров при концентрации заряженных частиц $\sim 10^{17} \text{ м}^{-3}$ до единиц сантиметров при концентрации плазмы $\sim 10^{15} \text{ м}^{-3}$, что позволяет изменять распределение плотности ионного тока по поверхности азотируемых изделий со сложной геометрией и формировать равномерный по толщине ($\pm 10\%$) азотированный слой.

6. Метод ионно-плазменного азотирования в стационарных и импульсно-периодических пучково-плазменных образованиях, генерируемых в сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом с инжекцией электронов, обеспечивает независимую регулировку основных рабочих параметров процесса азотирования – плотности ионного тока на поверхности материала, энергии ионов, состава газовой смеси, температуры изделия, что позволяет реализовать недоступные при обычном азотировании в аномальном тлеющем разряде технологические режимы и формировать требуемую структуру и фазовый состав азотированного слоя и достигать высоких функциональных свойств обрабатываемого материала.

7. Разработанные методики автоматизированной оценки и расчета параметров систем генерации объемно-однородных газовых пучково-плазменных образований позволяют рассчитывать конфигурации таких систем, параметры систем их электропитания, а также параметры плазменной среды, что подтверждается полученными экспериментальными результатами.

8. На основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом создан новый класс генераторов низкотемпературной плазмы, позволяющих в непрерывном и импульсном режимах горения разряда в полых катодах объемом до $0,3 \text{ м}^3$ в диапазоне давлений ($0,025 - 1,2$) Па при токах разряда ($10 \div 800$) А и напряжениях горения ($45 \div 500$) В при средней мощности в разряде до 30 кВт и импульсной мощности до 300 кВт создавать плазму с концентрацией $\approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$ с неоднородностью до 25 % и обеспечивать среднюю плотность ионного тока до 20 мА/см^2 на полый катод площадью до $\approx 2 \text{ м}^2$. По совокупности основных параметров процесса азотирования разработанные генераторы и установки на их основе превосходят известные аналоги и используются для упрочняющей ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на 12-й, 13-й, 14-й, 15-й, 16-й Международных конференциях по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (Томск, Россия, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022); 12-й и 14-й Международных конференциях «Газоразрядная плазма и ее применение» (Томск, Россия, 2015, 2019); 12-й и 14-й Международных конференциях «Пленки и покрытия - 2015» (ПиП-2015) и «Пленки и покрытия - 2019» (ПиП-2019) (г. Санкт-Петербург, Россия, 2015, 2019); 13-й Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (Новосибирск, Россия, 2017); Всероссийской конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, Россия, 2017); IV Научно-технической конференции молодых специалистов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (Железногорск, Россия, 2017), 21-й Международной конференции «Модификация материалов пучками ионов» (SMMIB-2019) (Томск, Россия, 2019); Международной конференции «Ядерная и радиационная

физика и материалы» (NRPM 2019) (Ереван, Армения, 2019); 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2019) (г. Минск, Беларусь, 2019); Семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Обь-2019»; XII Всероссийской научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (г. Казань, 2020, Россия, дистанционно); XXVI-й Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, Россия, 2022); Международной конференции “Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application” (SFR-2022) (г. Новосибирск, 2022, Россия); 16-й Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (GDPA-2023) (Уфа, Россия, 2023); Курчатовском форуме синхротронных и нейтронных исследований (Курчатов ФСНИ, 2023, г. Москва, Россия).

Личный вклад автора состоит в том, что автором внесен определяющий вклад в постановку цели и задач исследований, разработку основных конструктивных решений, анализ полученных результатов. Автором лично выдвинуты основные идеи исследований, спланированы и проведены эксперименты, сделано большинство оценок, проанализированы и осмыслены полученные данные, сформулированы положения, выносимые на защиту. В постановке задач и обсуждении полученных результатов принимал активное участие научный консультант. Численные и аналитические расчеты, а также ряд важных экспериментов был проведен при непосредственном участии автора. Соавторы, принимавшие участие в исследованиях и разработках по отдельным направлениям, указаны в списке работ по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 30 публикациях, в том числе в 21 статье в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ, в 5 статьях в зарубежных научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также в 4 патентах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников и приложений, включающих документы об использовании результатов работы. Полный объем диссертации – 390 страниц, включая 180 рисунков, 33 таблицы, 2 приложения, список литературы из 180 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, методология и методы исследования, достоверность и обоснованность результатов, личный вклад автора, представлена структура и краткий обзор диссертации.

Первая глава «Современное состояние исследований в области генерации объемных плазменных образований в тлеющих разрядах низкого давления с полым катодом» посвящена обзору состояния исследований в области генерации объемной плазмы в тлеющих разрядах с полым катодом.

В главе описываются закономерности горения тлеющих разрядов с полым катодом при низких (≈ 1 Па) давлениях и показаны преимущества использования плазмы разрядов низкого давления. Рассмотрены особенности генерации плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом при токах до

40 А. Приведены данные о влиянии параметров разряда на однородность распределения концентрации плазмы в полном катоде. Приведены литературные данные по снижению степени неоднородности при использовании сеточного эмиссионного электрода, рассеивающего поток электронов, инжектируемых в тлеющий разряд. Сравнительный анализ разрядных систем для формирования потока инжектируемых в плазму тлеющего разряда электронов, способных обеспечить токи свыше 100 А показал, что перспективными являются самостоятельные (дуговые, с самокалящимся катодом) и несамостоятельные (двухступенчатые, с накалимым катодом) разряды низкого давления. В одном из разделов приводится краткий обзор работ в области моделирования процессов генерации плазменных образований при низком давлении. Представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого (10^{-2} - 1) Па давления с полным катодом (см. рисунок 1), в котором генерируются исследуемые в диссертационной работе объемно-однородные пучково-плазменные образования с концентрацией $\approx 10^{12}$ см $^{-3}$, и повышенной ($> 1\%$) степенью ионизации в больших ($> 0,1$ м 3) вакуумных объемах. Область полученных ВАХ лежит в области токов до 1 кА и напряжений горения до 400 А.

Рассмотренные закономерности процессов азотирования позволили определить перспективные режимы генерации объемно-однородных газовых ППО в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления для реализации эффективных процессов обработки металлов и сплавов. На основании проведенного анализа сформулированы ключевые задачи исследований.

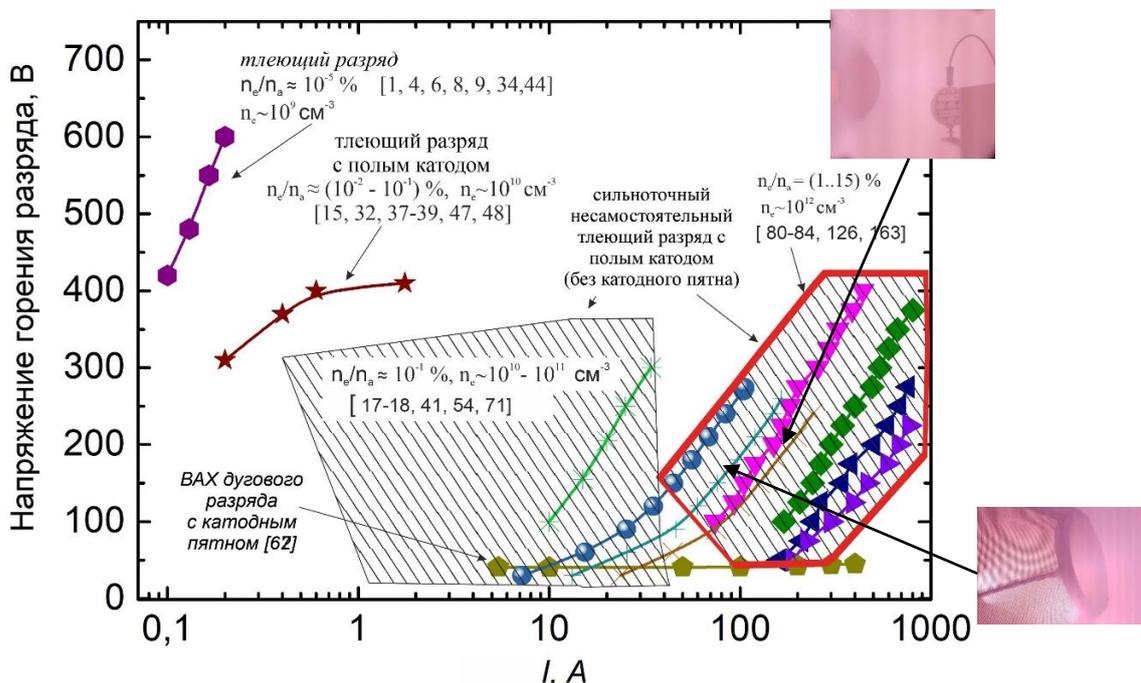


Рисунок 1 – Вольт-амперные характеристики тлеющих и дуговых разрядов в области рабочих давлений (10^{-3} - 10^3) Па

Во второй главе описаны разработанные методики оценки и расчета параметров систем генерации газовых технологических и эмиссионных ППО. Приведены схемы и конструкции экспериментальных макетов генераторов объемно-однородных ППО на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда, с

использованием которых проводились исследования, а также методики измерения параметров и состава генерируемых ППО. В главе описаны средства моделирования процессов генерации пучково-плазменного образования и распределения параметров плазмы в объеме полого катода и кратко представлены материаловедческие методы определения физико-механических свойств, а также структуры и фазового состава в приповерхностных слоях металлов и сплавов после обработки в ППО.

Для проведения систематических исследований процессов зажигания и горения сильноточного, до нескольких сотен ампер, несамостоятельного тлеющего разряда с полыми катодами большого объема, поддерживаемого внешней инъекцией пучка электронов, и процессов генерации пучково-плазменных образований были разработаны методики расчета геометрических параметров электродных схем, электрических параметров, а также основных параметров объемно-однородных ППО. На рисунке 2 приведен алгоритм реализации методики оценки и расчета конфигурации системы генерации технологического ППО в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда и параметров систем электропитания.



Рисунок 2 – Обобщенный алгоритм оценки и расчета конфигурации системы генерации ППО в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда и параметров систем электропитания

На основе разработанных методик был рассчитан, разработан, изготовлен и оптимизирован ряд экспериментальных и опытно-промышленных систем генерации ППО с полыми катодами объемом (0,2 -0,3) м³.

В главе приведены особенности вспомогательных источников электронов на основе дуговых разрядов низкого давления, которые использовались для генерации

эмиссионной плазмы и пучков электронов, инжектируемых в ППО основного тлеющего разряда. Представлено описание генераторов ППО и экспериментальных стендов, на которых проводились исследования закономерностей генерации газовых и газо-металлических ППО и закономерностей обработки поверхности материалов и изделий, представленных в главах диссертации. На основе разработанных методик оценки и расчета систем генерации ППО и практических работ в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ были созданы несколько стендов: генератор газовых ППО с полым катодом объёмом $0,2 \text{ м}^3$ (см. рисунки 3.а и 3.б); генератор газовых ППО с полым катодом протяженной формы объёмом $0,3 \text{ м}^3$ (см. рисунки 4.а и 4.б), включая модификацию с двумя источниками электронов (см. рисунок 4.в); генератор газовых ППО с протяженным, длиной 1 м, цилиндрическим эмиттером электронов, генерирующим радиально-расходящийся пучок электронов (см. рисунки 5.а и 5.б); генератор газо-металлических ППО.

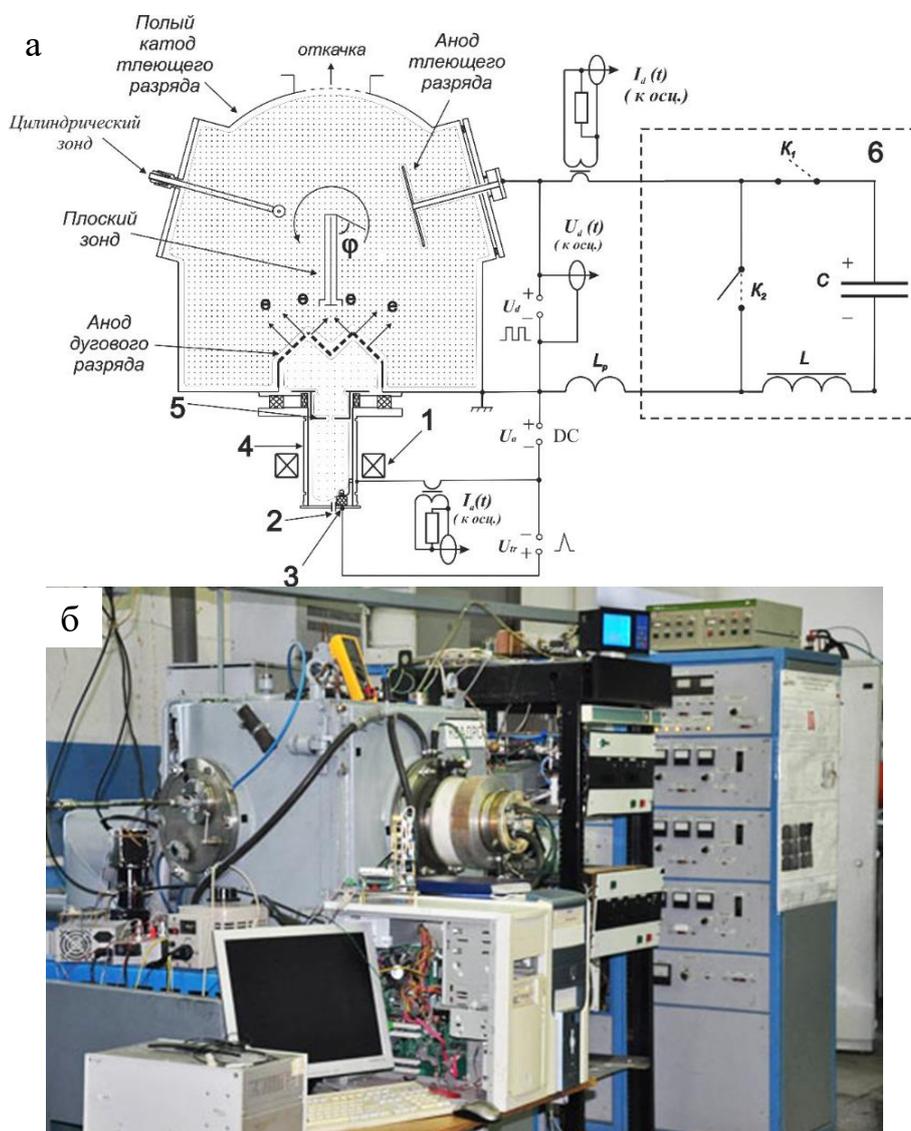


Рисунок 3 – Генератор газовых ППО с полым катодом объёмом $0,2 \text{ м}^3$ (а): 1 – катушка магнитного поля, 2 – ввод для напуска газа, 3 – поджигающий электрод, 4 – полый катод вспомогательного дугового разряда, 5– дугогаситель, 6 – схема выходных цепей источника питания самостоятельного тлеющего разряда; (б) – фотография генератора газовых ППО с полым катодом объёмом $0,2 \text{ м}^3$

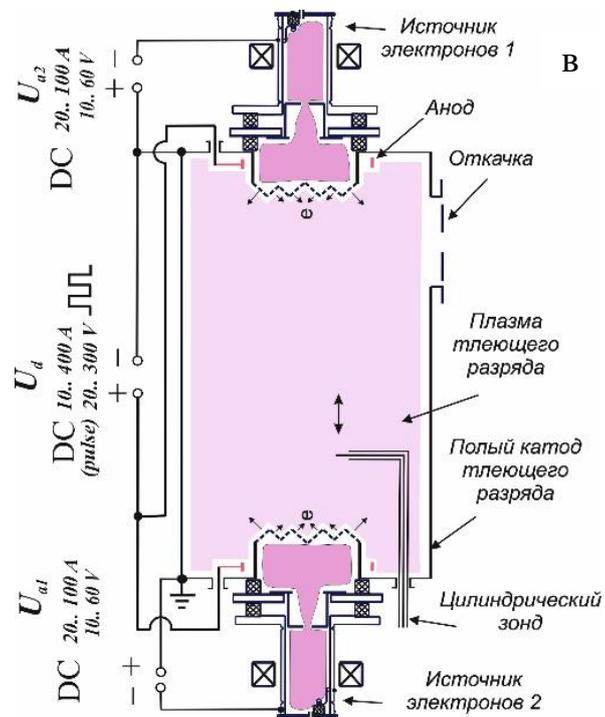
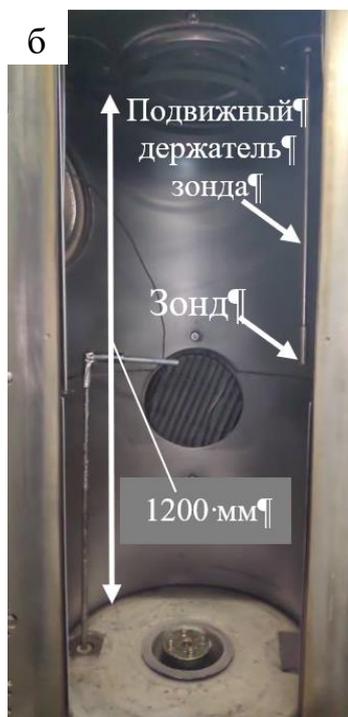
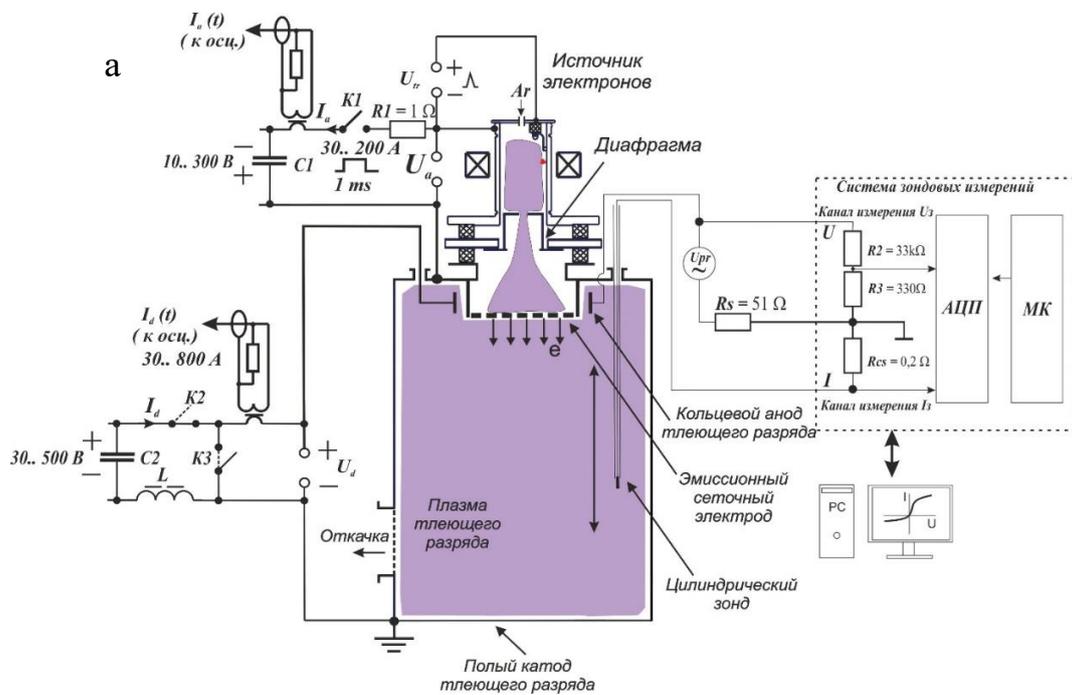


Рисунок 4 – Схема генератора газовых ППО с полым катодом протяженной формы объемом 0,3 м³ (а); изображение внутреннего пространства рабочей камеры с цилиндрическим зондом для измерения продольного распределения плотности ионного тока в полым катодом протяженной формы (б); схема экспериментального стенда с двумя источниками электронов (в)

В разделе описаны системы и методики зондовых измерений параметров ППО, а также кратко описаны методика измерения эмиссионных спектров исследуемых ППО, методики материаловедческих исследований, которые включали методы оптической, растровой и просвечивающей микроскопии, измерения микротвердости и нанотвердости, рентгенофазового анализа, триботехнические испытания и метод

измерения жаростойкости покрытий с использованием синхротронного излучения, а также средства моделирования процессов генерации ППО и распределения плазмы в объеме полого катода тлеющего разряда.

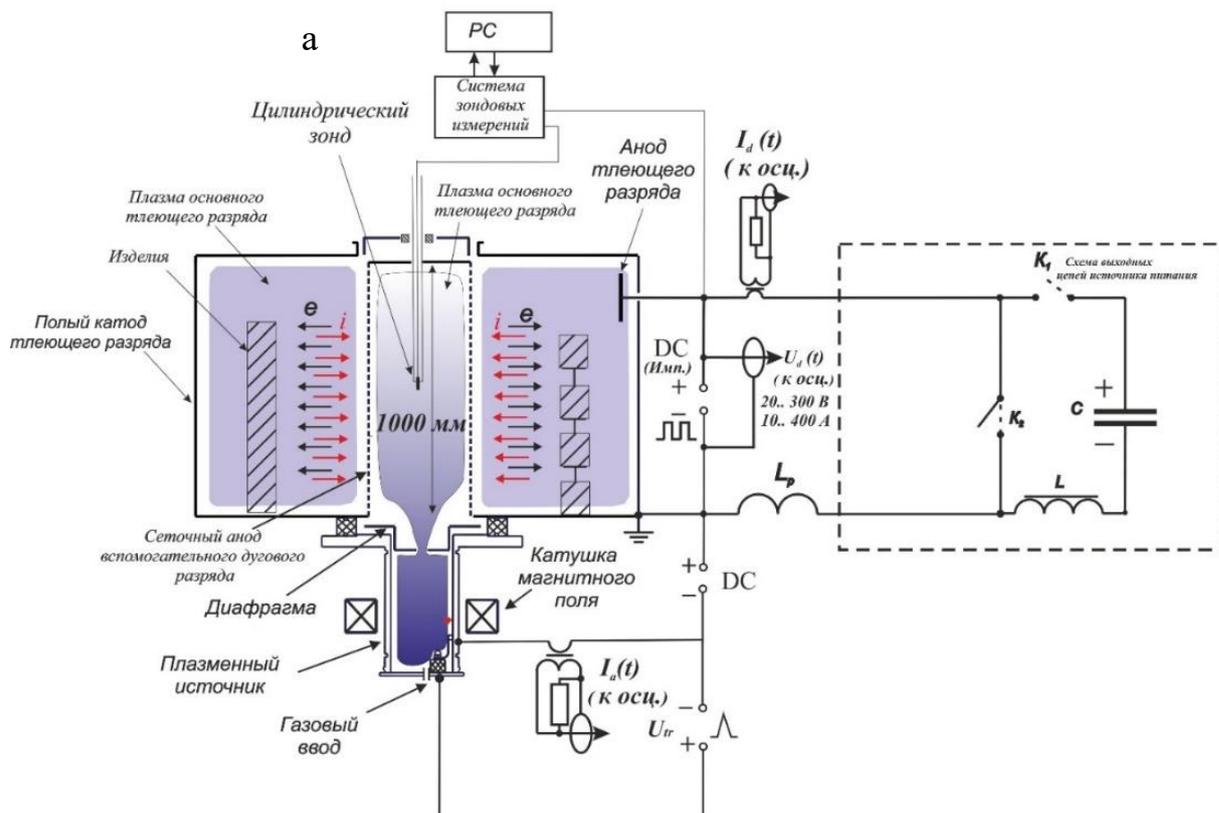


Рисунок 5 – Схема генератора газовых ППО с протяженным, длиной 1 м, цилиндрическим эмиттером электронов, генерирующим радиально-расходящийся пучок электронов (а); фотография внутреннего пространства полого катода с протяженным цилиндрическим эмиттером электронов (б)

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований условий стабильного зажигания и горения постоянного и импульсного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при токах в несколько сотен ампер, а также условий генерации в таком разряде пучково-плазменных образований (ППО) с однородным распределением концентрации заряженных частиц в больших ($> 0,1 \text{ м}^3$) вакуумных объемах. Описаны способы снижения степени неоднородности концентрации заряженных частиц в пучково-плазменном образовании путем изменения конфигурации эмиссионного электрода и путем использования двух источников электронов, работающих на общий объем генерируемой плазмы. В главе представлены также результаты исследований условий, про которых соблюдается и не соблюдается принцип суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц, полученных при работе отдельных источников электронов в системах генерации ППО с двумя источниками электронов.

Исследования особенностей зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда в субкилоамперном диапазоне токов проводились на экспериментальном стенде, схема и внешний вид которого представлены на рисунках 3.а и 3.б. В разных циклах исследований были получены характеристики тлеющего разряда при значительных, до 300 кВт, значениях мощности в разрядном импульсе. Характерные осциллограммы тока и напряжения горения разряда, полученные на стенде с полым катодом объемом $0,2 \text{ м}^3$ приведены на рисунке 6. В результате исследований определен диапазон токов, при которых тлеющий разряд стабильно зажигается и горит. В процессе исследований было обнаружено, что при определенных условиях, зависящих в основном от размера ячейки сетки конусного сеточного анода вспомогательного дугового разряда и рабочего давления, существует пороговый ток тлеющего разряда, при превышении которого наблюдается переход из квазистационарного режима горения разряда в режим неконтролируемого роста тока. Осциллограммы тока и напряжения горения импульсного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом в режиме неконтролируемого роста тока для сетки эмиссионного электрода с ячейкой $1 \times 1 \text{ мм}$ представлены на рисунке 7.а.

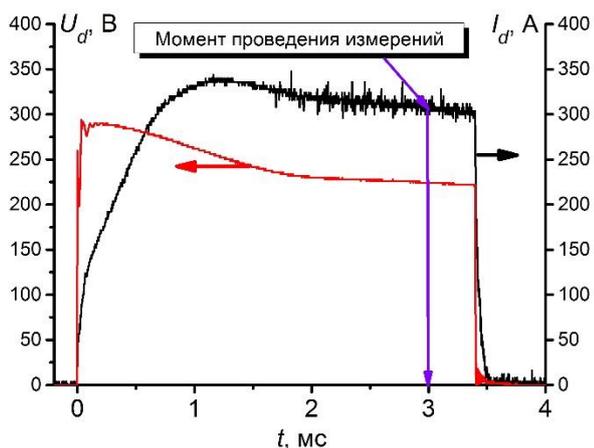


Рисунок 6 – Характерные осциллограммы импульсов тока и напряжения горения несамостоятельного тлеющего разряда

Указанный тип неконтролируемого роста тока отличается от случая образования катодного пятна (рисунок 7.б). Причиной нарушения устойчивого горения является нарушение условия слоевой стабилизации границы эмиссионной плазмы вспомогательного дугового разряда. В результате этого анодом для вспомогательного дугового разряда становится анод тлеющего разряда. Предполагаемый механизм роста токов подтверждается осциллограммами и проведенными оценками. Так, исходя из полученных данных о концентрации плазмы в тлеющем разряде, при токе тлеющего разряда около 120 А концентрация плазмы может составлять величину около $n_e \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$. При таком значении концентрации плазмы n_e , температуре электронов $T_e = 1 \text{ эВ}$ и напряжении

горения тлеющего разряда $U_d = 150$ В ширина катодного слоя $d_c \approx (\epsilon_0 / n_i)^{1/2} (U_d)^{3/4} / (ekT_e)^{1/4}$ составляет около $d_c \sim 0,25$ мм, то есть $2d_c < b$, где b – характерный размер ячейки сетки, равный 1 мм. Эта оценка показывает, что при повышенных концентрациях плазмы тлеющего разряда и соответствующем размере ячейки сетки может происходить нарушение слоевой стабилизации эмиссионной границы плазмы вспомогательного дугового разряда. Уменьшение ячейки сетки позволяет увеличить пороговое значение тока разряда, при котором возникает неконтролируемый рост тока. Использование эмиссионной сетки с ячейкой (0,4×0,4) мм позволило получить амплитуду тока тлеющего разряда около 800 А, при напряжении горения разряда 350 В и токе вспомогательного разряда около 100 А.

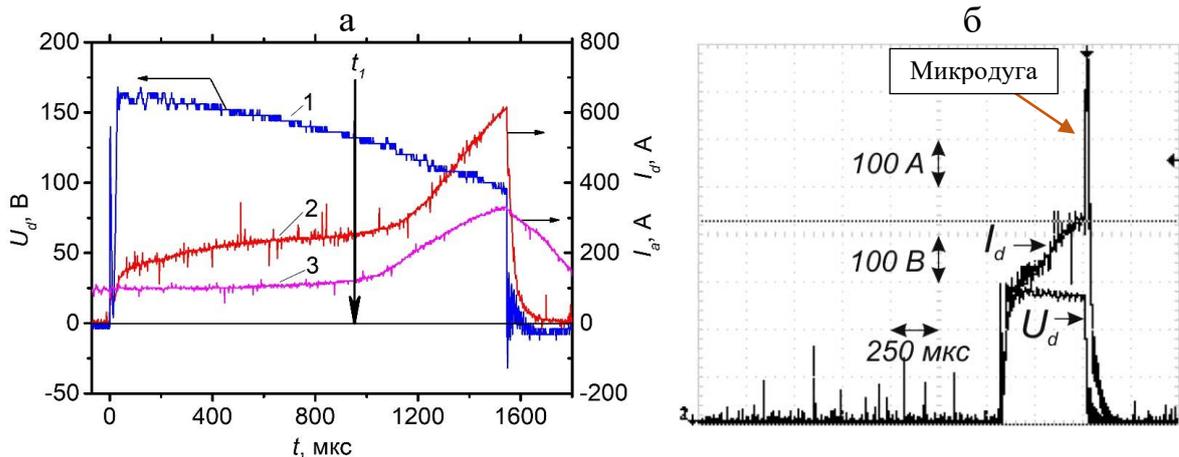


Рисунок 7 – Осциллограммы напряжения горения (1) и тока (2) несамостоятельного тлеющего разряда, тока вспомогательного дугового разряда (3) при $I_a = 90$ А, $f = 40$ Гц, $\gamma = 6\%$, ячейка сетки (1×1) мм (а); случай возникновения катодного пятна на полем катоде тлеющего разряда (б)

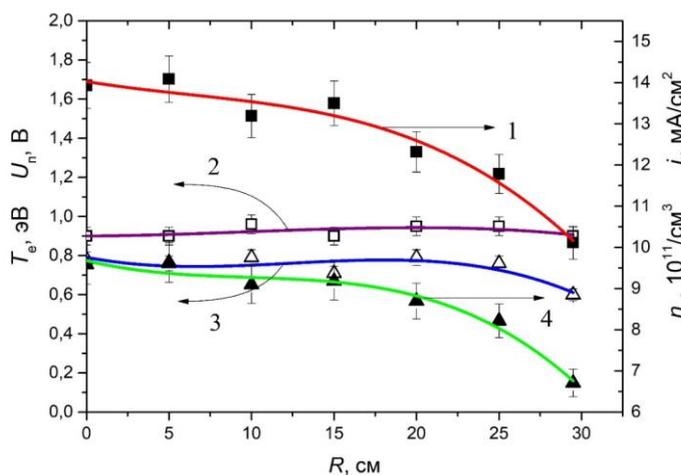


Рисунок 8 – Радиальные распределения параметров плазмы ($p = 0,65$ Па; $I_d = 90$ А; $U_d = 180$ В): 1 – плотность ионного тока на зонд j_i ; 2 – температура электронов T_e ; 3 – потенциал плазмы U_n , 4 – концентрация плазмы n_e . Центр камеры – 0 см

В разделе описаны результаты исследований влияния условий горения и параметров импульсного тлеющего разряда с полым катодом на однородность радиальных и азимутальных распределений плотности ионного тока насыщения из газового ППО. Основной цикл исследований проводился на стенде с полым катодом объёмом 0,2 м³ (см. рисунок 3.а). Измерения показали, что при напряжениях горения разряда (100 ÷ 250) В, рабочем давлении ≈ 1 Па, рабочем токе в диапазоне (50 ÷ 130) А характерные величины температуры электронов T_e и потенциала плазмы U_n в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде в атмосфере азота

составляют ~ 1 эВ и до ~ 1 В соответственно. Концентрация плазмы при токе ~ 100 А в центре камеры составляет $\approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$ (см. рисунок 8). Исследования влияния рабочего давления, напряжения горения, тока тлеющего разряда, соотношения $S_a : S_c$, формы эмиссионного сеточного электрода, а также влияния формы и расположения анода тлеющего разряда на однородность распределений концентрации плазмы в полом катоде тлеющего разряда показали, что снижение рабочего давления, повышение напряжения горения разряда, а также уменьшение соотношения $S_a : S_c$ до

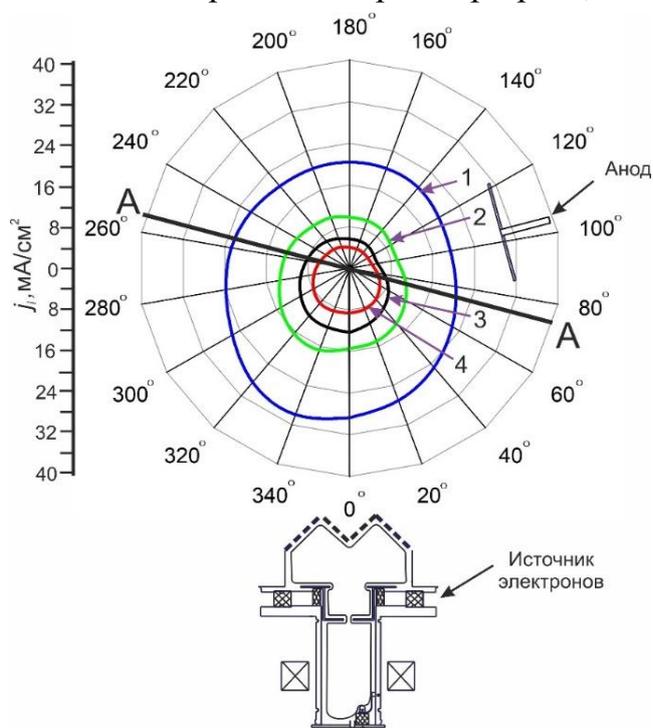


Рисунок 9 – Азимутальные распределения плотности ионного тока при $p(\text{N}_2) = 0,65$ Па, $U_d = 180$ В: 1 – $I_d = 240$ А; 2 – $I_d = 125$ А; 3 – $I_d = 90$ А; 4 – $I_d = 60$ А

величины, равной $\approx (2m_e/M)^{1/2}$, приводят к улучшению однородности плазмы при прочих равных условиях. Повышение тока тлеющего разряда в полых катодах объемом $0,2 \text{ м}^3$ и $0,34 \text{ м}^3$ за счет увеличения тока инжектированных электронов приводит к снижению степени неоднородности распределения плотности ионного тока на зонд. Так, при увеличении тока тлеющего разряда с 60 А до 240 А в полом катоде объемом $0,2 \text{ м}^3$, коэффициент неоднородности распределения, равный отношению максимального отклонения плотности ионного тока от среднего значения к среднему значению плотности ионного тока, уменьшается с 47% при 60 А до $\approx 32\%$ при 240 А (см. рисунок 9). ППО с повышенной, более 1% , степенью ионизации, формируемых при токах более 100 А в больших

вакуумных объемах перспективны для создания устройств с плазменными эмиттерами для генерации электронных пучков большого, более 1000 см^2 , сечения и возможностью получения плотности электронного тока эмиссии до 10 А/см^2 в импульсно-периодическом режиме при миллисекундной длительности импульсов тока.

Результаты исследований процессов генерации ППО в импульсном режиме горения при степени ионизации до $\approx 15\%$ в протяженном полом катоде длиной $1,2$ м диаметром $0,6$ м и объемом $0,34 \text{ м}^3$ демонстрируют возможность стабильной генерации ППО в субкилоамперной области токов тлеющего разряда. Характерные осциллограммы токов тлеющего и вспомогательного разрядов, напряжения горения тлеющего разряда представлены на рисунке 10.а. На рисунке 10.б показан ход вольт-амперных характеристик для разных давлений и токов вспомогательного дугового разряда 150 и 200 А. При высоких значениях тока тлеющего разряда зависимости при давлениях $0,025$ Па и $0,05$ Па практически совпадают (зависимости 4 и 5). При этом, в области тока тлеющего разряда около 800 А точки ВАХ для всех трех давлений становятся близки, что может объясняться влиянием повышенной степени ионизации, когда снижается средняя длина свободного пробега электронов за счет реакций

кулоновского взаимодействия, чье сечение взаимодействия σ_{ei} на 2 порядка выше сечения взаимодействия электронов с нейтралами σ_{ea} , а значит возникают дополнительные каналы утилизации энергии электронов. Для определения важнейших с точки зрения эмиссионной способности плазмы тлеющего разряда параметров, были проведены зондовые измерения параметров плазмы при разных давлениях при токах тлеющего разряда, близких к максимальному.

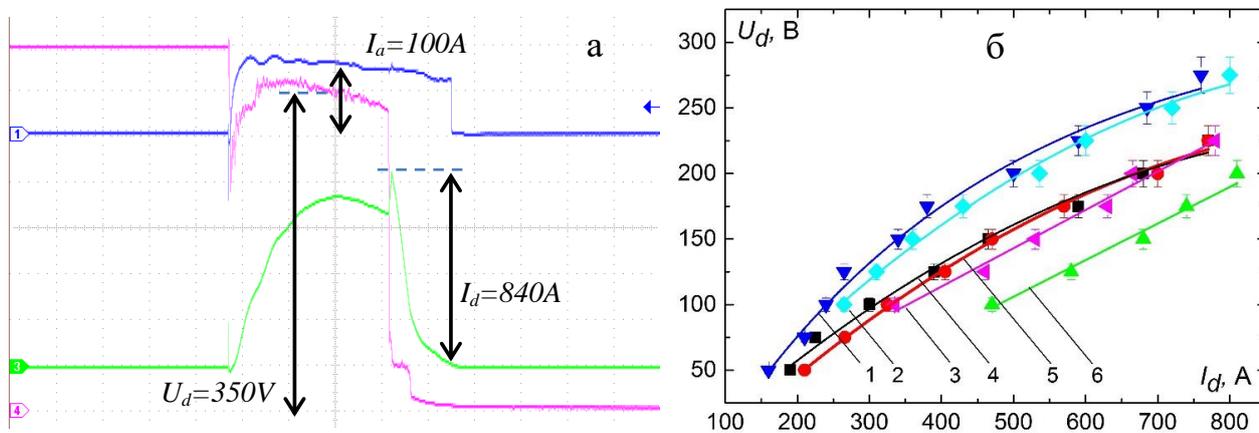


Рисунок 10 – Осциллограммы тока вспомогательного дугового разряда в источнике электронов (I_a), напряжения горения (U_d) и тока несамостоятельного тлеющего разряда (I_d) при давлении $p(\text{Ar})$ 0,025 Па. Временное разрешение – 200 мкс на деление. Длительность разрядного импульса – 1 мс. б – вольт-амперные характеристики несамостоятельного тлеющего разряда при значениях рабочего давления $p(\text{Ar})$: 0,025 Па (1, 4), 0,05 Па (2, 5), 0,25 Па (3, 6) и токах вспомогательного дугового разряда I_a 150 А (1, 2, 3), 200 А (4, 5, 6)

В таблице 1 приведены параметры плазмы, измеренные с использованием одиночного зонда. Во всех трёх случаях ток дугового разряда был равен 100 А. При низких, 0,05 Па и 0,025 Па, давлениях, которые наиболее перспективны для генерации электронных пучков, степень ионизации плазмы составила, соответственно, 10 % и 16 %. Оценки длины свободного пробега электронов при этих давлениях с учетом кулоновских взаимодействий в такой плазме показали, что длина свободного пробега λ_k между кулоновскими взаимодействиями примерно в 3,5 раза меньше, чем длина свободного пробега λ_i при взаимодействии с нейтралами.

Таблица 1 – Результаты измерений параметров плазмы несамостоятельного тлеющего разряда

Параметр	Условия		
	$p = 0,025$ Па; $I_a = 100$ А; $I_d = 750$ А; $U_d = 350$ В	$p = 0,05$ Па; $I_a = 100$ А; $I_d = 780$ А; $U_d = 325$ В	$p = 0,25$ Па; $I_a = 100$ А; $I_d = 780$ А; $U_d = 250$ В
Температура электронов, эВ	4	3,3	2,2
Потенциал плазмы, В	-14	-8,5	-2,3
Концентрация плазмы, см^{-3}	1×10^{12}	$1,2 \times 10^{12}$	$2,3 \times 10^{12}$
Степень ионизации, %	16	10	3,8

Следовательно, кулоновские взаимодействия при такой степени ионизации оказывают значительное воздействие на траектории движения заряженных частиц, коэффициенты диффузии заряженных частиц, межчастичное взаимодействие, а значит и утилизацию энергии электронов в плазме.

Проведенные исследования степени неоднородности продольного распределения концентрации заряженных частиц в ППО с повышенной степенью ионизации ($\approx 15\%$) в режиме $p(\text{Ar}) = 0,025$ Па, $I_a = 100$ А, $I_d = 750$ А, $U_d = 350$ В при движении одиночного цилиндрического зонда на расстоянии около 20 см от центральной оси полого катода показали, что степень неоднородности концентрации плазмы составляет около 10% (см. рисунок 11), несмотря на то, что используется один источник электронов, инжектируемых в полый катод тлеющего разряда.

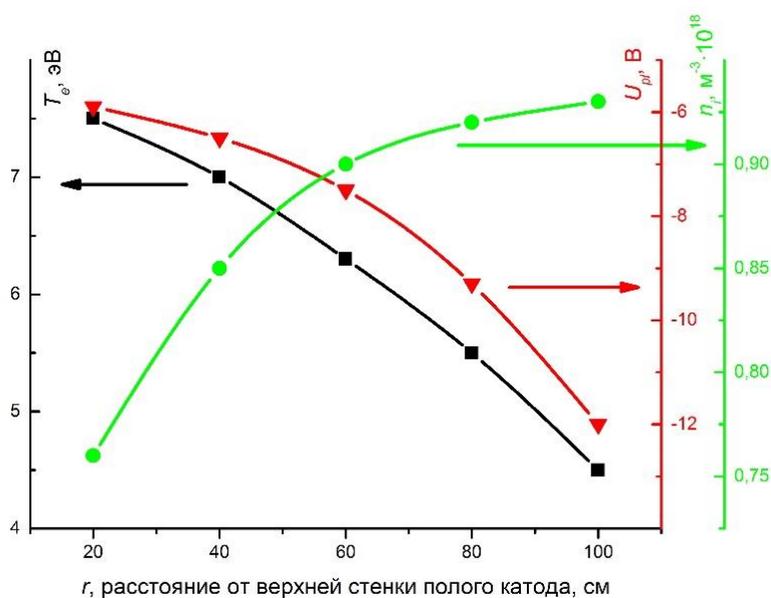


Рисунок 11 – Распределения параметров плазмы T_e , U_{pl} и n_i в полой катодной тлеющей разрядной трубе при $p(\text{Ar}) = 0,025$ Па, $I_a = 100$ А, $I_d = 750$ А, $U_d = 350$ В

Экспериментально полученные плотности электронного тока насыщения на зонд составили $3,7$ А/см² (0,025 Па), 5 А/см² (0,05 Па) и $6,7$ А/см² (0,25 Па), что достаточно для формирования импульсных и импульсно-периодических интенсивных электронных пучков большого, до нескольких десятков квадратных сантиметров, сечения.

Один из подразделов главы посвящен рассмотрению применимости принципа суперпозиции распределений плотности ионного тока из плазмы, извлекаемого на зонд, для прогнозирования распределения концентрации плазмы в полых катодах большого объема при работе двух и более источников электронов. Проверка возможностей прогнозирования распределения концентрации заряженных частиц в ППО с использованием принципа суперпозиции проводилась как в полой катодной трубе объемом $0,2$ м³, так и объемом $0,34$ м³. Схема второго экспериментального стенда с протяженным полой катодом представлена на рисунке 4.в. Измерялись продольные распределения параметров ППО с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра диаметром $0,8$ мм и длиной $4,5$ мм. Зонд перемещался вдоль оси цилиндрической вакуумной камеры с шагом 200 мм поочередно на расстояниях $R = 0$, 130 и 260 мм от оси вакуумной камеры. В ходе эксперимента сначала включали

источник электронов № 1 и получали продольное распределение концентрации плазмы. Затем источник электронов № 1 выключался, включался источник электронов № 2 и проводилось измерение продольного распределения концентрации ППО. Следующим шагом производились измерения при включении обоих источников электронов. Далее значения, полученные при отдельной работе источников электронов, складывались для получения алгебраической суммы распределений. Карты распределения концентрации заряженных частиц в ППО в полой катодной трубке строились по экспериментальным данным путем интерполяции по радиусу и экстраполяции по длине протяженного полого катода. На рисунке 12 представлено распределение концентрации плазмы при совместном включении источников электронов № 1 и № 2, при токах дугового разряда 20 А (режим 3). На рисунке 12.г представлено суммарное (алгебраическая сумма) распределение концентрации заряженных частиц в ППО при токах дугового разряда 20 А (режим 4).

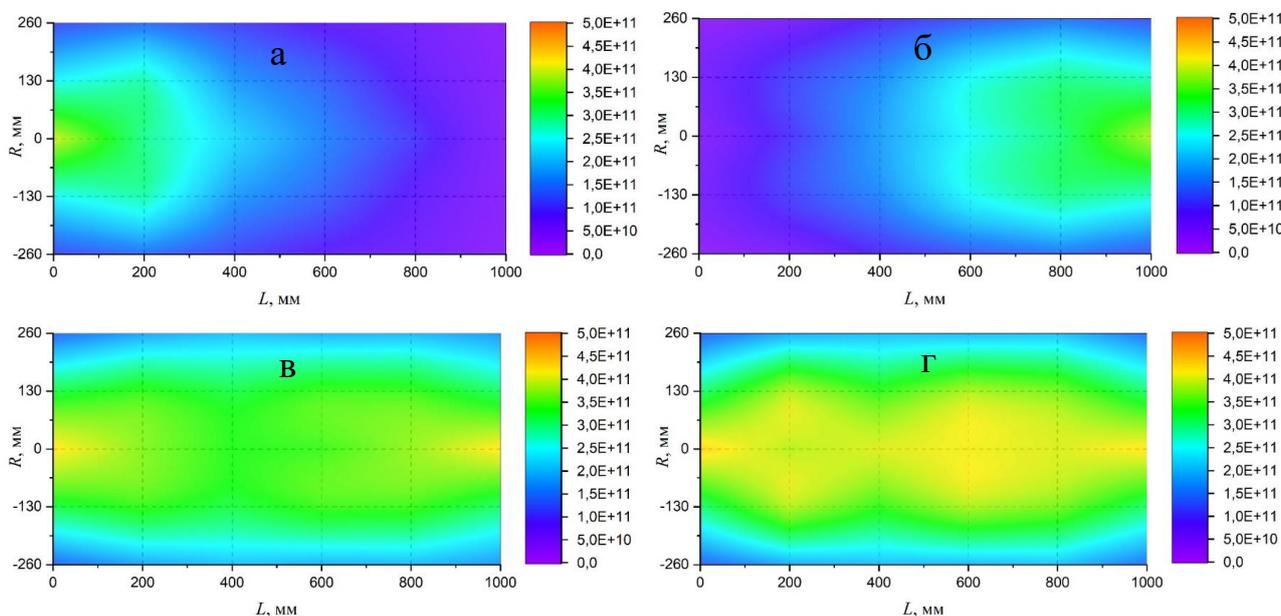


Рисунок 12 – Распределения концентрации заряженных частиц в газовом ППО (при токах вспомогательных разрядов 20А): а (режим 1) – ист. электронов №1 – вкл., ист. электронов №2 – выкл. ($I_d \approx 45$ А); б (режим 2) – ист. электронов №1 – выкл., ист. электронов №2 – вкл. ($I_d \approx 45$ А); в (режим 3) – ист. электронов №1 и №2 – вкл. ($I_d = 90$ А); г (режим 4) – алгебраическая сумма распределений, полученных по режимам 1 и 2

Максимальные коэффициенты неоднородности продольных распределений концентрации заряженных частиц в ППО для режимов 3 и 4 наблюдались на радиусе 260 мм, то есть вблизи стенок полого катода, и составляли ≈ 25 %. Сравнение экспериментального распределения (режим 3) и алгебраической суммы (режим 4) при токе тлеющего разряда 90 А показали небольшие различия значений концентрации плазмы по абсолютному значению, а также слабые отличия в коэффициентах неоднородности (таблица 2). Это свидетельствует о высокой степени соблюдения принципа суперпозиции для данных условий эксперимента.

Увеличение тока вспомогательных дуговых разрядов до 45 А (см. рисунок 13) приводит примерно к двухкратному изменению концентрации заряженных частиц, с $\approx 3,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $\approx 7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (см. рисунок 13.в), а также изменению коэффициентов неоднородности продольных распределений концентрации заряженных частиц,

полученных для экспериментального распределения (режим 7) и алгебраической суммы (режим 8) на разных расстояниях R от оси полого катода.

Таблица 2 – Коэффициент неоднородности продольного распределения концентрации заряженных частиц

R, мм	k_N , режим 1	k_N , режим 2	k_N , режим 3	k_N , режим 4
0	100%	87%	14%	6%
130	80%	74%	8%	15%
260	70%	79%	25%	26%

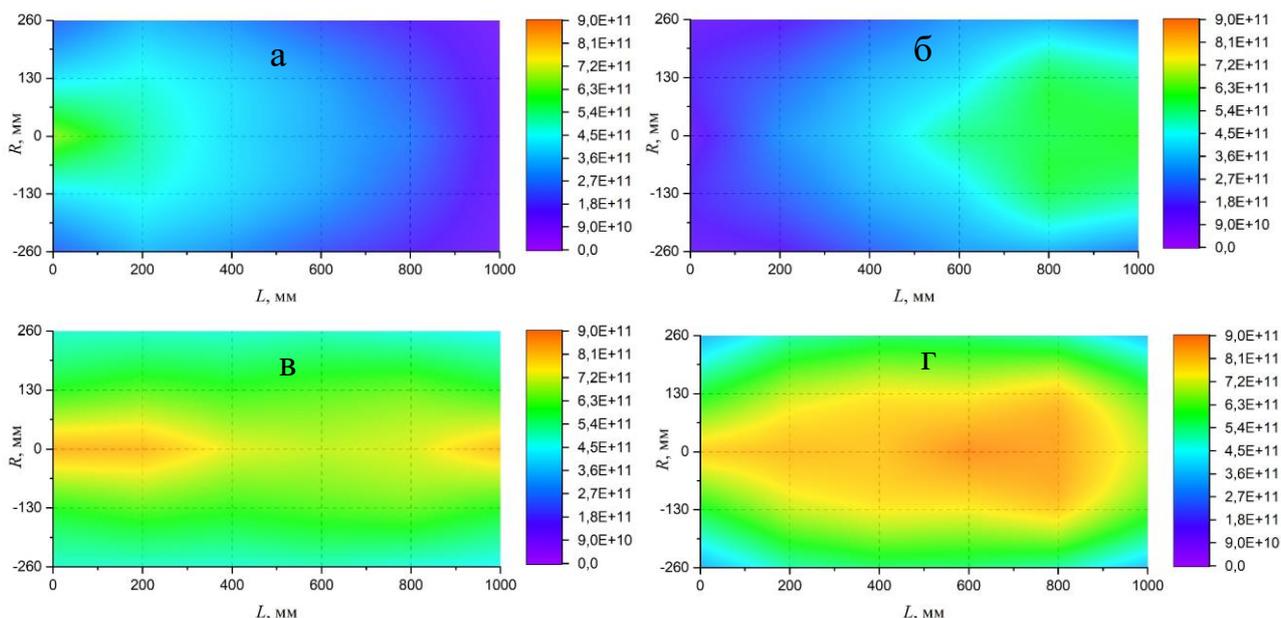


Рисунок 13 – Распределения концентрации заряженных частиц в газовом ППО (при токах вспомогательных разрядов 45А): а (режим 5) – ист. электронов №1 – вкл., ист. электронов №2 – выкл. ; б (режим 6) – ист. электронов №1 – выкл., ист. электронов №2 – вкл.; в (режим 7) – ист. электронов №1 и №2 – вкл. ($I_d = 200$ А); г (режим 8) – алгебраическая сумма распределений, полученных по режимам 1 и 2

Исследования продольных распределений концентрации заряженных частиц для режима 7 свидетельствуют о том, что при увеличении тока тлеющего разряда до 200 А при работе двух источников электронов степень неоднородности распределений (таблица 3) значительно ниже, чем при токе тлеющего разряда 90 А. Повышение концентрации плазмы приводит к более низкому коэффициенту неоднородности распределения, чем предсказывает принцип суперпозиции. Разница между алгебраической суммой распределений концентраций заряженных частиц (режим 8) и экспериментальным распределением (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). Значительное расхождение наблюдается при R = 260 мм. Для определения причин этого расхождения были проведены расчеты распределения потенциала плазмы в ППО.

Таблица 3 – Коэффициент неоднородности продольного распределения концентрации заряженных частиц

$R, \text{ мм}$	$k_N, \text{ режим 5}$	$k_N, \text{ режим 6}$	$k_N, \text{ режим 7}$	$k_N, \text{ режим 8}$
0	75%	74%	8%	12%
130	66%	58%	4%	18%
260	62%	57%	5%	27%

На рисунке 14 представлено распределение потенциала плазмы при совместной работе двух источников электронов с токами 20 А и 45 А (режим 3 и режим 7, соответственно).

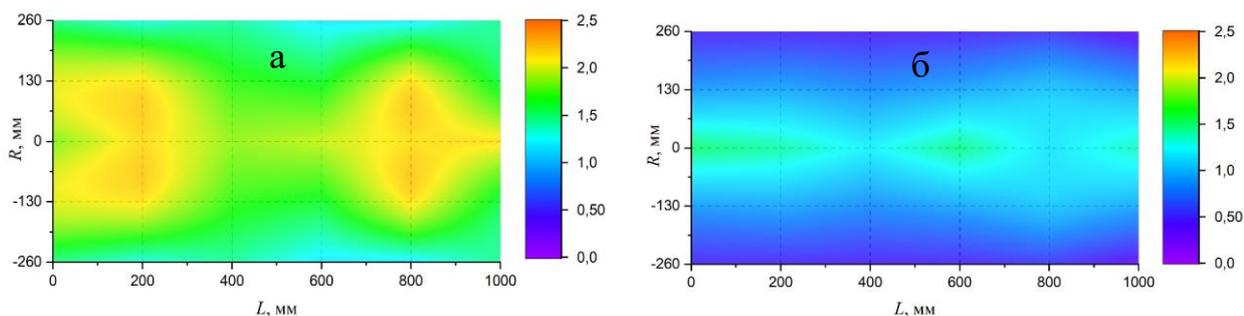


Рисунок 14 – Распределение потенциала плазмы при токах дугового разряда 20 А (а) (режим 3); распределение потенциала плазмы при токах дугового разряда 45 А (режим 7) (б)

Из представленных результатов видно, что при токах дугового разряда 45 А распределение потенциала плазмы становится более неоднородным, поперечные градиенты потенциала плазмы составляют более 1 В, тогда как при токах 20 А примерно в два раза меньше. Средний разброс значений потенциала плазмы для режима 3 составляет примерно 0,7 В, а для режима 7 – 1,4 В. Это должно приводить к увеличению коэффициентов подвижности и диффузии заряженных частиц в поперечном направлении при увеличении концентрации заряженных частиц в ППО. Необходимо также отметить, что при увеличении общего тока инжекции с ≈ 20 А до ≈ 40 А средняя температура электронов в ППО возрастает примерно с 0,9 эВ до 1,1 – 1,2 эВ.

Результаты численного моделирования в дрейфово-диффузионном приближении показали, что распределение концентрации заряженных частиц (рисунок 15) в полем катоде практически однородное, температура электронов в ППО лежит в интервале (1,4 – 0,7) эВ при изменении давления в диапазоне (0,025 – 1,5) Па.

Результаты моделирования показывают высокую степень применимости принципа суперпозиции, однако результаты эксперимента демонстрируют значительно меньшую неоднородность концентрации заряженных частиц, и соответствующее этому некоторое, на уровне $\pm 10\%$, отличие распределений – алгебраической суммы распределений и экспериментально полученного распределения для одновременной работы источников электронов. Вероятной причиной некоторого несоблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации плазмы является то, что при включении двух источников электронов увеличивается суммарная плотность заряда ρ_{Σ} встречных пучков электронов по сравнению с включением одиночного источника $\rho_{1,2}$, и соответственно увеличиваются

градиенты электрического поля в ППО и электронная температура, как показано выше, что обуславливает увеличение скорости диффузии частиц.

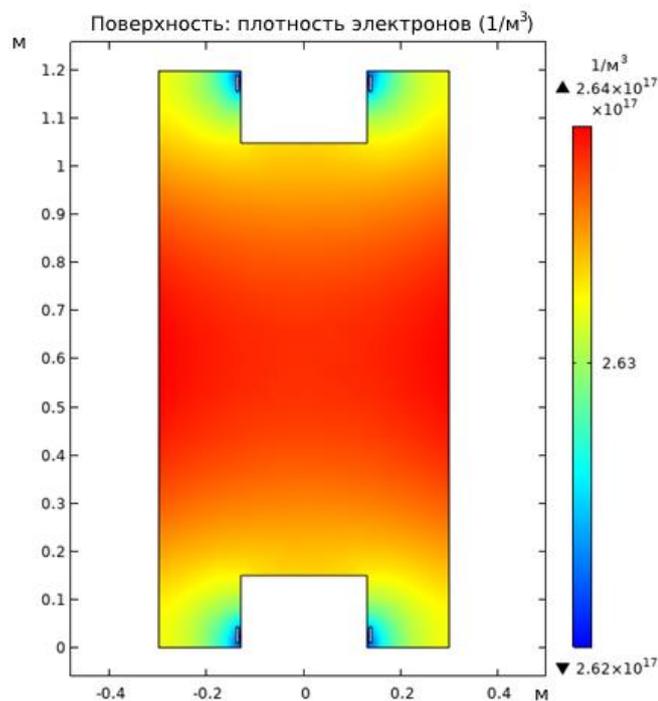


Рисунок 15 – Пространственное распределение концентрации плазмы в полном катоде

Экспериментальные результаты, изложенные выше, показывают, что увеличение тока тлеющего разряда (> 100 А) вплоть до 200 А за счет увеличения общего электронного тока инжекции до ≈ 40 А, при которых степень ионизации плазменного образования составляет около 1 % и более (при концентрации заряженных частиц $\approx (6-8) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) приводит к возрастанию степени невыполнения принципа суперпозиции распределений концентраций заряженных частиц, что выражается в постепенном увеличении разницы значений концентрации заряженных частиц между экспериментальным распределением и полученным в результате алгебраической суммы. Основной причиной этого, по-видимому, является снижение длины свободного пробега между кулоновскими взаимодействиями и соответствующее этому увеличение коэффициентов подвижности и диффузии заряженных частиц в продольном и поперечном направлениях, приводящее к резкому снижению степени неоднородности концентрации заряженных частиц в ППО.

На основе результатов исследований динамики концентрации заряженных частиц в ППО в импульсно-периодическом режиме горения тлеющего разряда в главе сделан вывод, что в создаваемых системах, исходя из длительностей фронтов и спадов импульсов разрядного тока, рационально использовать системы электропитания с частотой следования разрядных импульсов $f = (0.1 - 2)$ кГц с дискретностью 100 Гц, коэффициентом заполнения $\gamma = (1-99)$ %.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментальных исследований закономерностей влияния условий генерации в полном катоде несамостоятельного тлеющего разряда объемом около $0,3 \text{ м}^3$ протяженных газовых пучково-плазменных образований в системе с протяженным полым цилиндрическим сетчатым плазменным

эмиттером электронов на основе дугового разряда. Рассмотрены результаты измерений степени неоднородности продольного распределения концентрации заряженных частиц в ППО, сформированных в полом катоде тлеющего разряда и полом цилиндрическом сеточном аноде вспомогательного дугового разряда, в зависимости от рабочего давления, напряжения горения тлеющего разряда, тока дугового разряда.

Представленные в главе исследования выполнялись на экспериментальном стенде, схема которого показана на рисунке 5. В ходе исследований использовались два протяженных сеточных анода дугового разряда длиной около 1000 мм и диаметрами 115 мм и 200 мм, боковые стенки которых были перекрыты мелкоструктурной сеткой с размерами ячейки сетки 0,4×0,4 мм. В цикле исследований на продольную степень неоднородности дуговой плазмы оценивалось влияние следующих рабочих параметров горения вспомогательного дугового разряда: ток дугового разряда, давление, род газа (N_2 или Ar). На рисунке 16 приведена фотография свечения ППО в атмосфере азота при напряжении горения тлеющего разряда 150 В и токе вспомогательного дугового разряда 50 А.

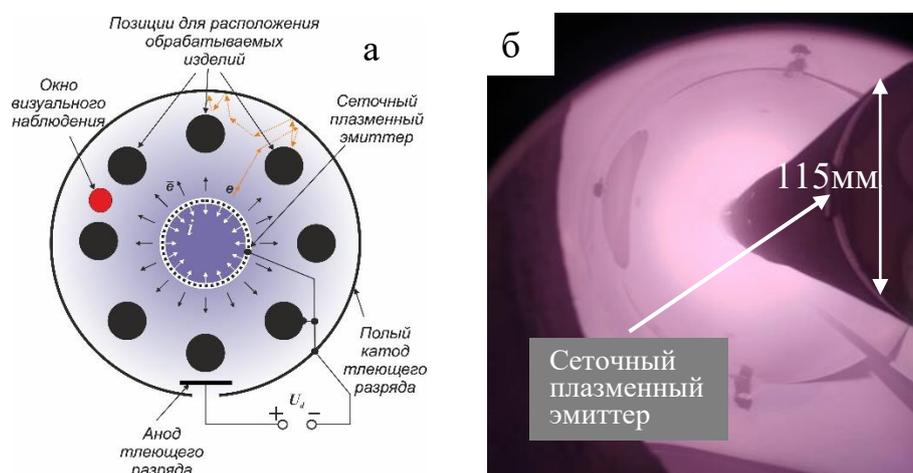


Рисунок 16 – Схема электродной системы (вид сверху) (а) и свечение плазменного образования в полом катоде тлеющего разряда в окне для визуального наблюдения (б)

При исследовании влияния рабочего давления на степень продольной неоднородности плотности ионного тока на одиночный зонд из плазмы вспомогательного разряда в полом сеточном аноде был получен ряд зависимостей (см. рисунок 17). В отсутствие основного тлеющего разряда и, соответственно, потока ионов из плазменного образования основного тлеющего разряда внутрь полого анода через ячейки сетки, распределение плотности ионного тока имело неоднородный характер (см. рисунок 17.а) и максимальное значение плотности ионного тока наблюдалось на входе полого анода со стороны расположения дугового плазменного источника. Плотность ионного тока спадала почти до нуля на длине 50 см. Увеличение диаметра полого анода со 115 мм до 200 мм лишь незначительно снижало неоднородность плазмы по длине полого анода. Для обоих диаметров снижение рабочего давления приводило к некоторому улучшению однородности.

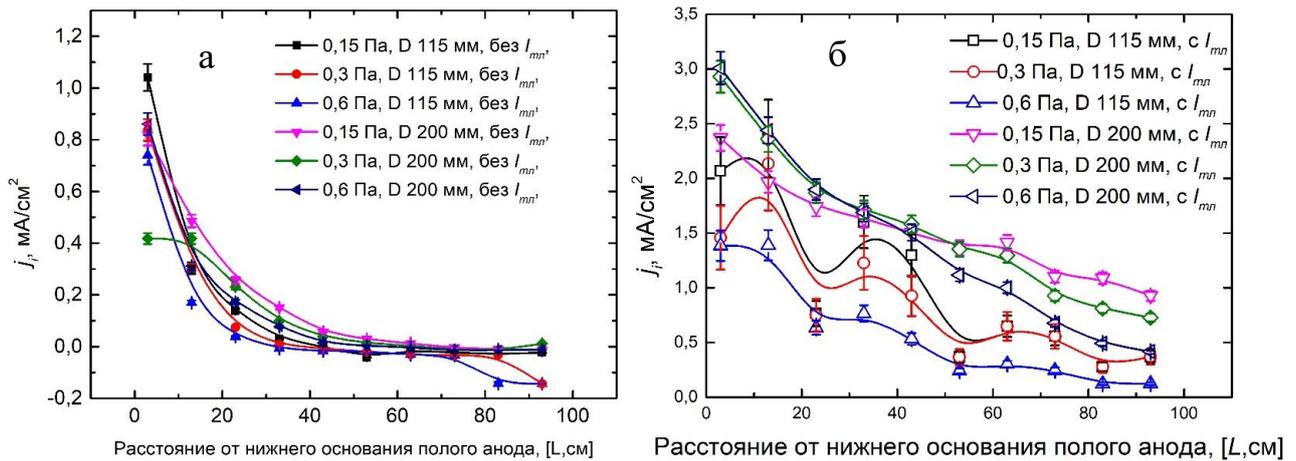


Рисунок 17 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере азота (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) без тлеющего разряда (а) и с тлеющим разрядом (б)

При зажигании тлеющего разряда с напряжением горения 150 В (см. рисунок 17.б) плазма формировалась на всем протяжении полого анода, а плотность ионного тока из плазмы значительно (в 2–3 раза) возрастала по сравнению со случаем отсутствия тока тлеющего разряда. Минимальная неоднородность продольного распределения плотности ионного тока при токе дугового разряда 50 А достигалась при диаметре 200 мм, давлении 0,15 Па и составляла около $\pm 40\%$. Для диаметра полого анода 115 мм часть измеряемых точек на длинах $L = 3, 23, 53$ см лежит на распределении значительно ниже соседних точек. Это связано с тем, что данные точки соответствуют положению цилиндрического зонда в областях геометрической тени по отношению к потоку ионов из плазмы тлеющего разряда, формируемой стальными кольцами (ширина около 3 см), установленными для увеличения жесткости сеточной структуры протяженного сеточного эмиттера. То есть дополнительный поток ионов из основного тлеющего разряда значительным образом не только улучшал продольную равномерность плазмы в полом аноде дугового разряда, но и увеличивал значения плотности ионного потока на зонд. Увеличение диаметра полого анода до 200 мм снижало влияние фактора геометрической тени и на распределениях практически отсутствуют минимумы плотности ионного тока (см. рисунок 17.б). Исследования распределений плотности ионного тока в атмосфере аргона (см. рисунок 18.а) показывают ту же закономерность: при снижении рабочего давления степень неоднородности уменьшается, составляя при рабочем давлении 0,15 Па около $\pm 25\%$. Повышение напряжения горения тлеющего разряда со 150 В до 200 В в азоте приводит при идентичном значении тока вспомогательного дугового разряда 50 А к пропорциональному увеличению тока тлеющего разряда и, соответственно, к возрастанию ионного тока в эмиттер электронов через ячейки сетки. Это влечет за собой лишь повышение плотности ионного тока на зонд, что и демонстрируют полученные зависимости (см. рисунок 18.б).

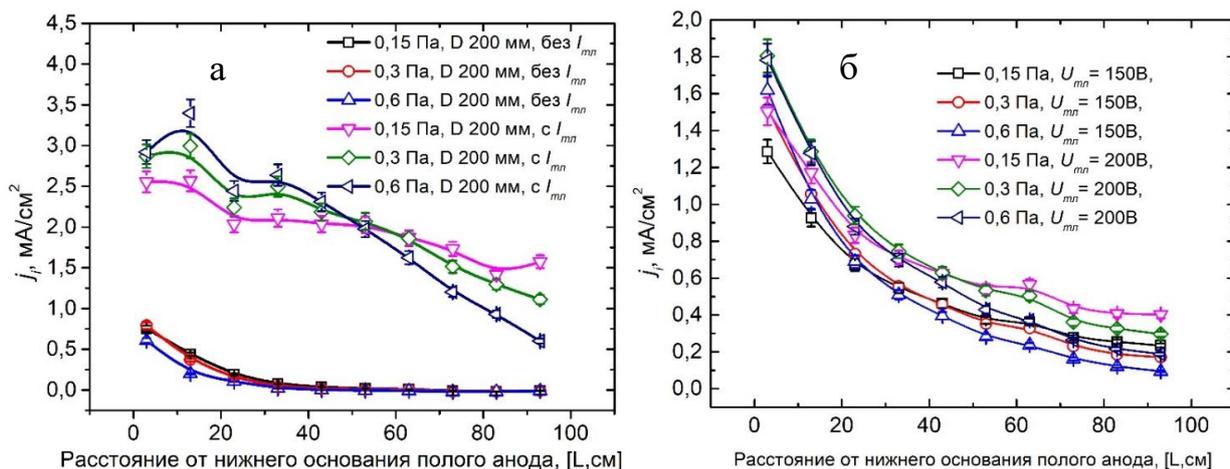


Рисунок 18 – Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере аргона (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом (а) и распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере азота (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом

Проведенные исследования показывают, что система генерации протяженных пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде, в котором в качестве источника вспомогательной плазмы (откуда инжектируются электроны в тлеющий разряд) используется источник на основе дугового разряда с протяженным, длиной около 1 м, полым сеточным анодом (плазменным эмиттером электронов) позволяет получить пучково-плазменные образования с удовлетворительной степенью неоднородности. Продольная степень неоднородности плотности ионного тока на зонд на длине 1 м в полном аноде при давлении 0,15 Па в атмосфере аргона составляет $\pm 25\%$, а в чистом азоте – $\pm 40\%$. Показано, что увеличение диаметра цилиндрического протяженного, длиной 1 м, полого сеточного анода дугового разряда примерно в 2 раза, со 115 мм до 200 мм, располагающегося на оси полого катода тлеющего разряда, способствует снижению неоднородности продольного распределения плотности ионного тока с $\pm 65\%$ до $\pm 40\%$ при давлении 0,15 Па. Снижение рабочего давления с 0,6 Па до 0,15 Па позволяет значительно (на 30 – 40 %) уменьшить продольную неоднородность концентрации плазмы в полном аноде. К снижению степени неоднородности приводит также увеличение напряжения горения и соответствующее увеличение тока основного тлеющего разряда с полым катодом, благодаря увеличению ионного тока, инжектируемого внутрь полого сеточного анода. Полученные результаты позволяют оптимизировать размеры полого протяженного сеточного анода, а также системы электропитания и управления системами генерации ППО в целом, добиваясь удовлетворительного для проведения технологических процессов уровня степени неоднородности распределения плотности ионного тока из ППО на обрабатываемые материалы и изделия.

Для подтверждения экспериментальных результатов влияния потока ионов из основного тлеющего разряда на снижение степени неоднородности плазмы, формируемой в протяженном сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда, было проведено моделирование процессов генерации пучково-плазменного образования, формируемого в полном сетчатом эмиттере. Во всех численных

экспериментах было принято, что тлеющий разряд зажигается и горит в квазистационарном режиме.

Численное моделирование процессов, происходящих в пучково-плазменном образовании, формируемом в полном сеточном эмиттере электронов, проводилось для объяснения влияния потока ионов на снижение степени неоднородности плотности ионного тока с применением метода крупных частиц. На рисунке 19 представлена конфигурация аксиально-симметричной счетной области. Через боковую границу цилиндрического анода в направлении оси симметрии инжектируются ионы (с начальной энергией W и током I_b) в эквипотенциальное пространство (пространство дрейфа) с неоднородным распределением плазмы. Плотность тока инжекции однородная.

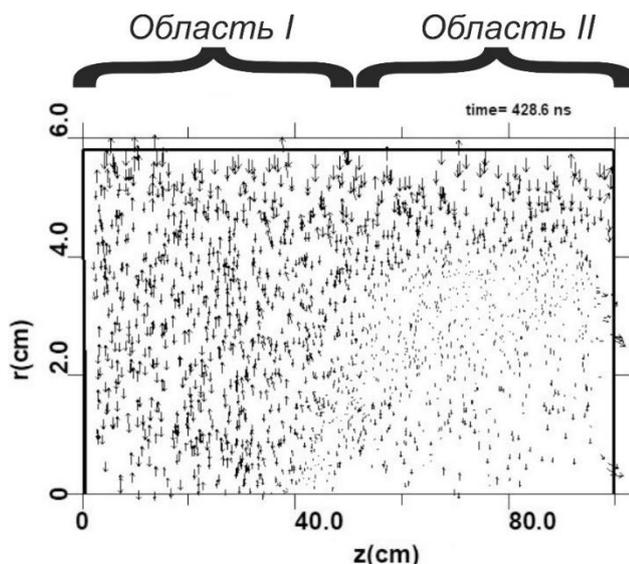


Рисунок 19 – Расчетная область цилиндрического полого анода. Стрелки – вектора скоростей ионов, поступающих через ячейки сетки (0 см на оси абсцисс – плоскость нижнего основания полого анода, 0 см на оси ординат – ось симметрии полого анода)

В расчете распределение концентрации плазмы в полном аноде определяется внешним источником и задается в соответствии с измеряемой в эксперименте плотностью ионного тока (см. рисунок 18). При баллистической фокусировке ионов, инжектируемых из плазмы основного тлеющего разряда, к оси цилиндрического сеточного анода вспомогательного дугового разряда плотность тока возрастает обратно пропорционально расстоянию до оси симметрии и неоднородное распределение концентрации плазмы определяет разные условия транспортировки инжектируемых с боковой границы ионов. В области, ограниченной сечениями $z = 0 - 50$ см (область I) концентрация плазмы n_{pl} на 2 порядка превышает концентрацию быстрых ионов, зарядовая компенсация быстрых ионов позволяет им проходить все пространство дрейфа (сечение цилиндра) (см. рисунок 19). В области II ($z = 50 - 100$ см) недостаточное количество плазменных электронов обуславливает увеличение положительного потенциала U , торможение ионов и их отражение при $W = eU$ (формирование виртуального анода). На рисунке 19 стрелками показаны вектора скоростей в пространстве дрейфа ионов пучка.

В области I (при параметрах эксперимента) в результате столкновений с атомами газа ионы в результате процессов перезарядки превращаются в быстрые нейтральные молекулы. При энергии ионов 150 – 200 эВ сечение перезарядки для

молекул азота и аргона, согласно литературным данным, составляет $\sigma_c = 30 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ и $35 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ соответственно. При давлении (0,15–0,6) Па плотность молекул газа $n_g = (0,4 - 1,6) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, длина $\lambda_c = 1/n_g \sigma_c$ перезарядки ионов азота равна (8,3 – 2) см и аргона (7 – 1,7) см. Исходя из этого, можно оценить изменение концентрации плазмы за счет перезарядки ионов за время импульса тока разряда τ : $\Delta n_I = n_b \tau v / D$, где v – скорость иона, величина Δn_I сравнима с концентрацией плазмы в начале сетчатого анода дугового разряда вблизи источника дуги. Поэтому плазма в области *I* образуется в результате нейтрализации положительного объемного заряда медленных ионов, образующихся при перезарядке, нейтрализация которых происходит электронами, эмитируемыми с сетчатого анода и его боковых торцов, и электронами тока из вспомогательного разряда. На рисунке 20.а представлено распределение плотности плазменных электронов в области *I* на разных радиусах системы, здесь же показано начальное распределение плотности плазмы.

В области *II* при формировании виртуального анода ионизация газа плазменными и вторичными (за счет ионно-электронной эмиссии) электронами, ускоренными в потенциальном поле ионного пучка, является одним из основных процессов формирования пучково-плазменного образования. Время формирования ионно-пучковой плазмы и ее концентрация зависят от давления газа, плотности тока ионов и их энергии. На рисунке 20.б показано распределение плотности плазменных электронов на разных радиусах системы (без тока ионного пучка концентрация ниже 10^8 см^{-3}).

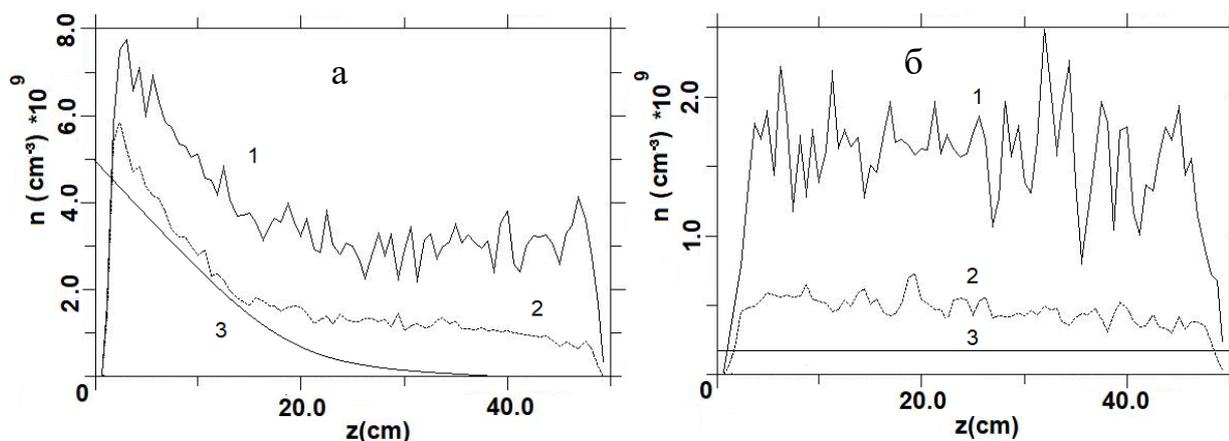


Рисунок 20 – Распределение электронов плазменного образования в области *I* (а) и *II* (б) на разных радиусах: 1 – $r = 0,6$ см; 2 – $r = 3$ см; 3 – распределение плазмы без тока ионов

Согласованность результатов численного моделирования с экспериментом позволяет считать, что основными механизмами формирования пучково-плазменного образования в протяженном цилиндрическом полой аноде являются перезарядка быстрых ионов основного разряда и ионизация остаточного газа. Продольная неоднородность пучково-плазменного образования определяется внешним источником дуговой плазмы и зависит от параметров внешнего ионного потока (ток ионов, их род и энергия) и полого анода (давление рабочего газа, конфигурация). Полученные результаты позволяют оптимизировать размеры полого протяженного сетчатого анода.

В заключительной части главы приведены рекомендации к построению системы генерации ППО на основе тлеющего разряда с протяженным сеточным плазменным эмиттером.

В пятой главе приведены результаты исследований эффективности использования газовых и газо-металлических ППО для ионно-плазменной обработки поверхности конструкционных и инструментальных материалов и изделий. Описываются особенности использования ППО для ионно-плазменной обработки, закономерности формирования слоев на поверхности сталей и титана с заданными свойствами методами азотирования и плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления

В главе описывается способ изменения ширины прикатодного падения потенциала для обработки изделий сложной формы. В приведенных результатах электрофизических исследований показано, что газовые ППО при соблюдении определенных условий характеризуются достаточно высокой однородностью по объему вакуумной камеры. Благодаря возможности независимой регулировки напряжения горения разряда, начиная от нескольких десятков вольт, рабочего давления в диапазоне (5×10^{-3} – 1) Па, состава газовой смеси, тока тлеющего разряда, за счет изменения тока инжектированных электронов из плазмы вспомогательного разряда, концентрация ионов в пучково-плазменных образованиях может плавно регулироваться в широчайшем диапазоне – (10^9 – 10^{12}) см^{-3} . При низком ($\approx (10^{-2}$ – 1) Па) давлении вероятность столкновения ионов, ускоренных в слое прикатодного падения потенциала или слое падения потенциала смещения обрабатываемой подложки, с частицами газа очень мала. При концентрациях заряженных частиц в ППО $\approx 10^{12}$ см^{-3} ширина слоя прикатодного падения потенциала составляет доли – единицы миллиметра. Благодаря этому за счет увеличения плотности потока ионов на поверхность труднодоступных областей изделий становится возможной эффективная обработка поверхности изделий сложной геометрии и формы, например, мелко модульных зубчатых передач (рисунок 21), используемых в различных приводах и механизмах поворота ответственных узлов. В случае относительно низких значений концентрации плазмы и относительно большой, более нескольких миллиметров, ширины прикатодного падения потенциала, плотность потока ионов из плазмы неоднородна на вершину, боковую поверхность и дно зуба с мелким модулем (рисунок 22). Низкая плотность потока ионов приводит к недостаточному травлению поверхности основания зуба снижению скорости азотирования (на рисунке плазма с n_{i1}). Повышенные значения концентрации ионов в пучково-плазменном образовании n_i позволяют снизить ширину прикатодного падения потенциала d_k до значений, при которых нет значительной разницы в плотности потока ионов по всей поверхности зуба с мелким модулем (на рисунке плазма с n_{i2}).

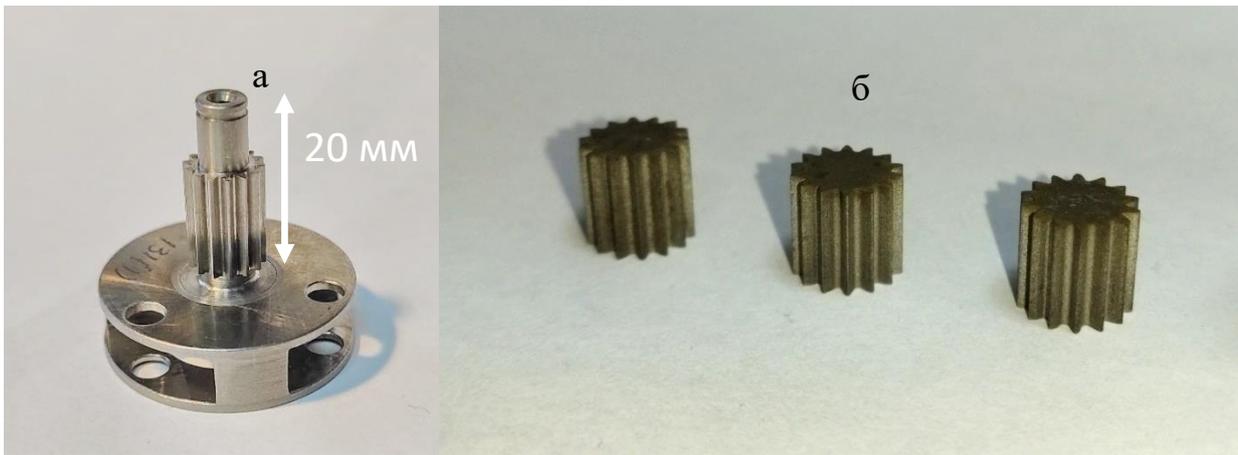


Рисунок 21 – Деталь мелко модульной зубчатой передачи (а) и экспериментальные образцы с зубчатым венцом, изготовленные электроэрозионным методом (б)

Однако необходимость независимого варьирования такими основными технологическими параметрами процесса азотирования, как температура изделия, энергия ионов, состав газовой смеси и рабочее давление, не позволяет проводить азотирование при высоких значениях концентрации плазмы, получаемых в постоянном режиме горения несамостоятельного тлеющего разряда, как из-за значительного нагрева, так и из-за распыления поверхности обрабатываемых изделий.

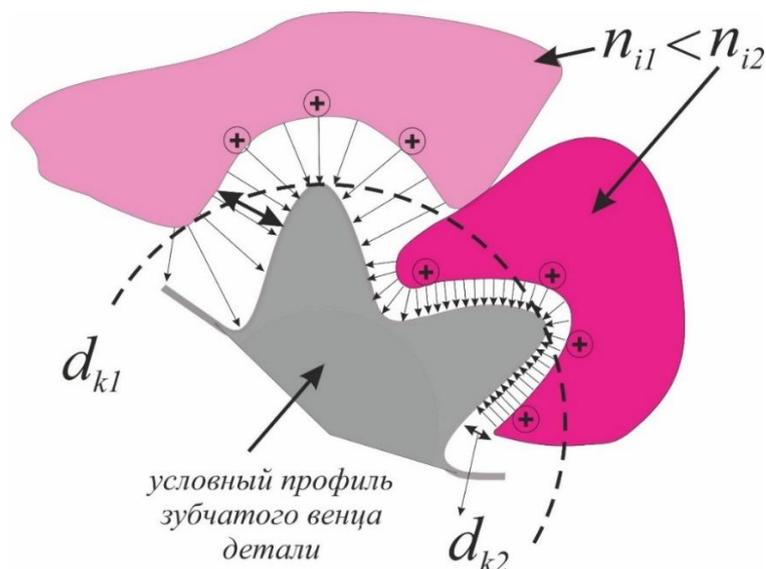


Рисунок 22 – Особенности поведения ширины прикатодного слоя d_k в ППО при изменении концентрации заряженных частиц

Использование импульсно-периодического режима формирования ППО с регулируемым коэффициентом заполнения импульса позволяет, сохраняя те же значения температуры азотирования детали, энергии ионов, ускоренных в слое прикатодного падения потенциала, состава рабочей газовой смеси и давления, достигать повышенных в несколько раз значений концентрации заряженных частиц. В моменты подачи разрядного импульса при формировании плазмы на фронте импульса ширина слоя d_k плавно уменьшается, достигая минимального значения, сохраняющегося в течение квазистационарного значения тока разряда. При снятии напряжения в паузах между разрядными импульсами ширина прикатодного слоя

увеличивается до максимального значения, и обработка изделия практически не происходит.

Для подтверждения влияния импульсно-периодического режима горения несамостоятельного тлеющего разряда на условия ионно-плазменного воздействия на поверхность стали (плотность ионного тока на поверхность, циклическое изменение ширины прикатодного слоя) и на результаты азотирования изделий зубчатых венцов с мелким модулем зуба были проведены сравнительные исследования однородности обработки поверхности зубчатых венцов с модулем зуба $m=0,5$. Для проведения исследований использовались образцы из конструкционной стали 38Х2МЮА с зубчатыми венцами, имеющими такие же геометрические размеры, как и у реального изделия (рисунок 21).

Оценка влияния повышенной концентрации плазмы производилась путем сравнения коэффициента неоднородности толщины азотированного слоя на вершине и в основании зуба при трех различных коэффициентах заполнения разрядного импульса импульсно-периодического разряда – 100, 85 и 50 %. Тлеющий разряд горел в азот-аргоновой смеси ($N_2 : Ar = 1:1$) при рабочем давлении около 0,6 Па и значении отрицательного напряжения смещения образцов 500 В. Частота следования разрядных импульсов в импульсно-периодическом режиме горения составляла 1000 Гц. Стадия очистки и нагрева изделия длилась около 1 ч до достижения температуры образца 460 °С, которая измерялась термопарой на детали с идентичной геометрией. Процесс азотирования шестерни длился 6 ч. После окончания процесса азотирования были изготовлены поперечные шлифы и проведено измерение распределений микротвердости по глубине. Результаты представлены на рисунке 23. Оценка неоднородности азотированного слоя на вершине и в основании зуба производилась по значению глубины азотированного слоя, при которой твердость азотированного слоя составляет 850 HV.

В таблице 4 приведены измеренные значения толщин азотированного слоя и рассчитанный коэффициент неоднородности, равный отношению отклонения от среднего значения (полученного по значениям на вершине и в основании зуба) микротвердости к среднему значению.

Таблица 4 – Режимы азотирования зубчатых венцов

Номер образца	Коэффициент заполнения разрядного импульса	Толщина слоя на вершине зуба, мкм	Толщина слоя в основании зуба, мкм	Коэффициент неоднородности, %
1	100	85	48	22
2	85	68	60	6
3	50	65	45	15

Коэффициент неоднородности толщины азотированного слоя наибольший при обработке в постоянном режиме генерации ППО. Степень неоднородности составляет 22 %, что почти в 4 раза больше, чем для режима с коэффициентом заполнения разрядного импульса $\gamma=85$ %. Предположительно, в постоянном режиме горения разряда осуществляется недостаточное травление поверхности в основании зуба. При $\gamma=50$ %, судя по малой глубине азотированного слоя, в основании зуба не успевает сформироваться плазма вблизи детали и травление в основании зуба также затруднено. Полученные результаты свидетельствуют, что использование импульсно-

периодического режима горения разряда может снизить неоднородность обработки почти в 4 раза. Однако необходимо обеспечивать некоторое оптимальное значение коэффициента заполнения разрядного импульса, при котором плазменное образование будет успевать сформироваться вблизи поверхности зубчатого венца и обеспечивать достаточную плотность ионного тока для эффективного травления поверхности основания зуба в процессе азотирования.

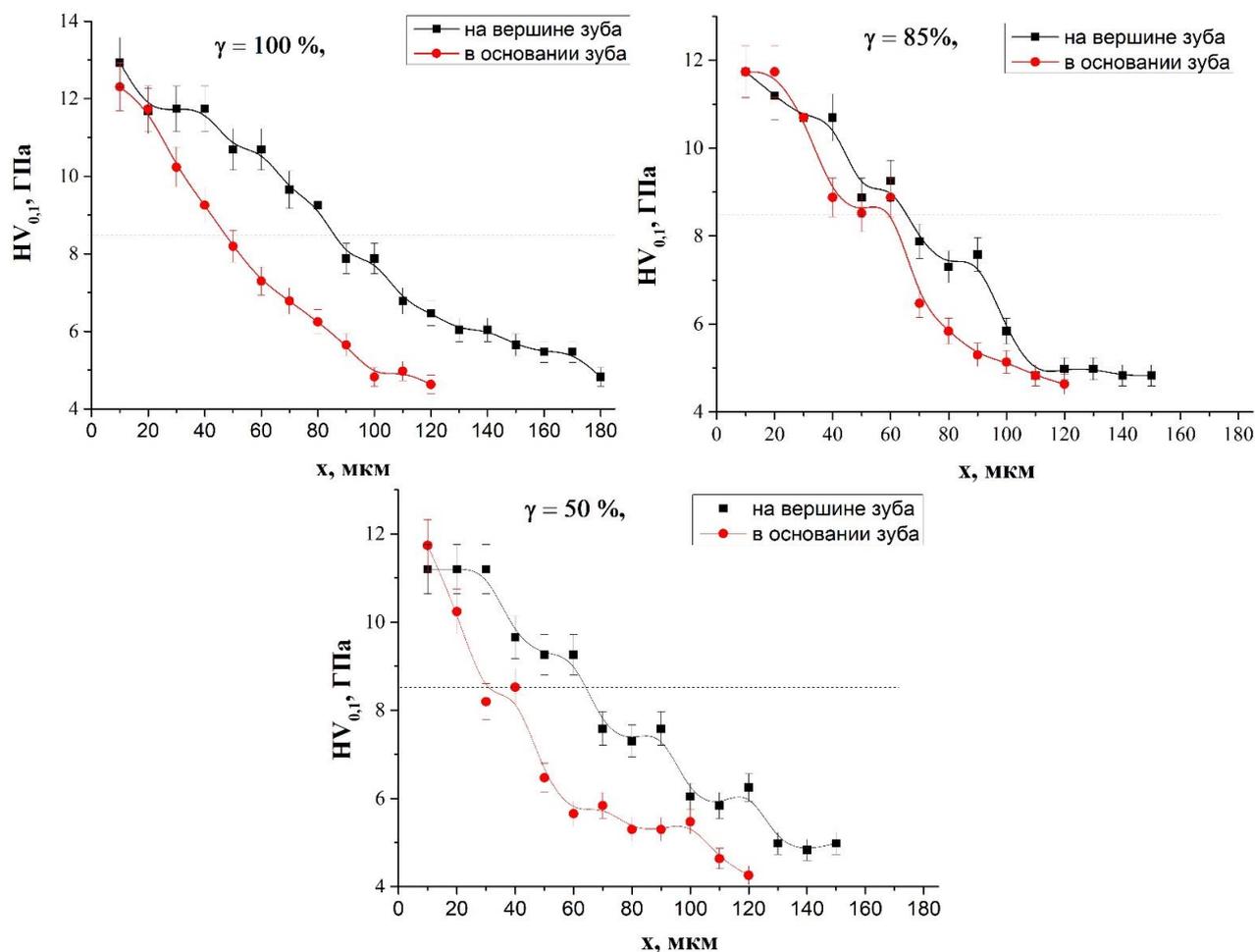


Рисунок 23 – Распределения микротвердости по глубине на вершине и в основании зуба шестерен для различных коэффициентов заполнения разрядных импульсов тлеющего разряда γ

По результатам проведенных исследований разработан и внедрен на промышленном предприятии технологический процесс ионно-плазменного азотирования изделия из стали 38Х2МЮА – шестерни с мелким модулем зуба. Показано, что прогнозируемый срок службы азотированных в ППО зубчатых мелкозубчатых шестерен увеличивается примерно в 4 раза.

В главе приводятся результаты исследований закономерностей эволюции фазового состава, структуры модифицированного слоя инструментальной стали, сформированного после азотирования в газовом ППО. Газовые ППО, благодаря возможности независимого варьирования всеми основными рабочими параметрами, в частности энергией ионов, бомбардирующих поверхности обрабатываемого материала, позволяют управлять процессами фазообразования в ходе ионно-

плазменного азотирования сталей. Путем регулирования таких параметров, как плотность потока ионов на поверхность, состав бомбардирующих ионов, энергия ионов и температура поверхности, можно устранять нежелательные для определенных приложений фазы с высоким содержанием азота, например FeN , Fe_{2-3}N , Fe_4N , добиваясь формирования преимущественно только твердого раствора азота в α -железе.

При исследовании микроструктуры поверхности образцов (см. рисунок 24) стали 4Х5МФС было выявлено, что после азотирования в смеси с содержанием азота в газовой смеси 100 %, 50 % и 25 % структура поверхности состоит из тонкого, до 10 мкм, нитридного слоя и диффузионного слоя толщиной 80–90 мкм. В газовой смеси с содержанием азота 10 % (парциальное давление азота около 0,15 Па) наблюдается только диффузионный слой, нитридный слой отсутствует.

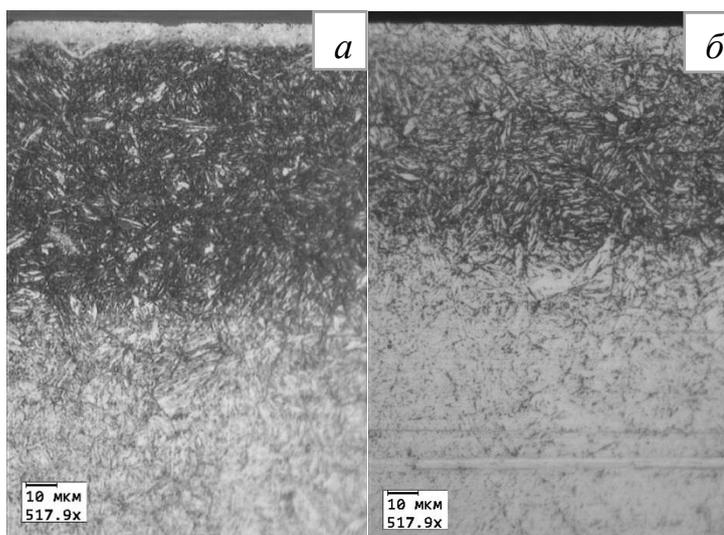


Рисунок 24 – Изображение микроструктуры стали 4Х5МФС после азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси: *a* – N_2 (100%); *б* – $\text{N}_2(10\%)+\text{Ar}(90\%)$; величина отрицательного напряжения смещения – 200 В

Генерация плазмы в атмосфере чистого азота позволяет создавать насыщающую плазменную среду, способную для температуры азотирования стали 520 °С в избытке поставлять к поверхности азот. Поскольку наиболее медленной фазой процесса азотирования является диффузия азота вглубь материала, то на поверхности скапливается избыток азота, приводящий к формированию хрупких нитридных фаз. Снижение парциального давления азота в рабочей газовой смеси при том же суммарном давлении за счет добавления аргона приводит сначала к снижению фазы $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ и увеличению фазы $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, а затем и к формированию только твердого раствора азота в железе и фазы CrN .

Проведенные измерения показали, что наиболее низкий коэффициент трения характерен для поверхности без нитридного слоя на азотированной стали. Минимальный износ, который в 5–6 раз ниже, чем после азотирования в других смесях газов, также характерен для случая твердого раствора азота в стали при азотировании в газовой смеси $\text{N}_2(10\%)+\text{Ar}(90\%)$.

Заключительная часть главы посвящена исследованию процессов плазменно-ассистированного напыления покрытий в объемно-однородных газо-металлических пучково-плазменных образованиях. Результаты исследований показали, что газо-металлические пучково-плазменные образования, формируемые при низком давлении, перспективны в процессах нанесения функциональных покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом, что подтверждено в циклах исследований по синтезу многокомпонентных нитридных покрытий систем TiAlN и (Zr+TiBSiNi)N.

Выявленные закономерности и особенности ионно-плазменной обработки материалов в газовых и газо-металлических ППО стали основой для разработки технологических режимов обработки изделий, выпускаемых промышленностью.

Шестая глава посвящена описанию ряда экспериментальных и опытно-технологических установок для реализации процессов ионно-плазменной обработки методами ионно-плазменного азотирования и плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления, созданных на основе исследований закономерностей генерации пучково-плазменных образований в полых катодах большого объема и разработанных генераторов газовых и газо-металлических ППО, а также их импульсных источников электропитания.

В первом подразделе главы описана установка с объемом полого катода около 0,2 м³ (см. рисунок 25) для генерации газовых объемно-однородных пучково-плазменных образований для работы в атмосфере как инертных газов (Ar), так и реактивных газов (N₂, O₂). Установка представляет собой стойку управления и технологический модуль – стальную раму, внутри которой и на которой установлены основные узлы и системы установки – вакуумная камера с внешними размерами 650×650×650 мм, вакуумная система на основе форвакуумного и турбомолекулярного насосов, источник электронов, узел установки обрабатываемых изделий, система напуска газов, система водяного охлаждения (см. рисунок 26). Технологический модуль соединен кабельной линией со стойкой электропитания и управления, в

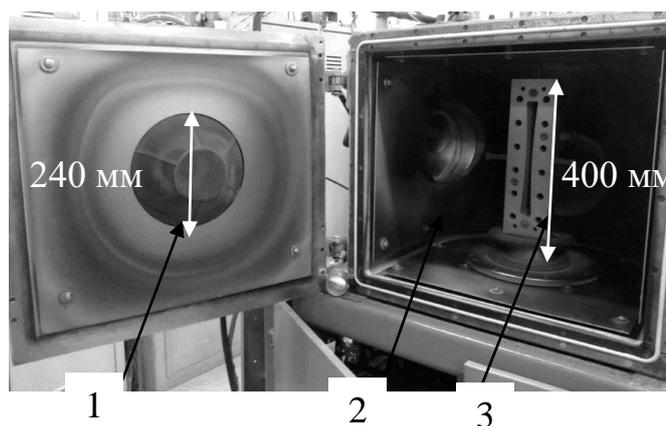


Рисунок 25 – Фотография полого катода (камеры) генератора ППО с размещенной внутри стальной деталью (фильерой):
1 – сеточный эмиссионный электрод источника электронов; 2 – стенки полого катода (камеры); 3 – обрабатываемая деталь

которой располагается щит автоматики, консоль оператора на основе персонального компьютера, источник бесперебойного питания, источники электропитания основного тлеющего разряда, источника электронов и подачи потенциального смещения. Специально разработанная программа управления позволяет проводить технологические процессы в автоматическом режиме. Для этого с использованием промышленного контроллера ОВЕН произведена автоматизация таких систем, как система газонапуска трех газов, измерения температуры обрабатываемого изделия, измерения рабочего давления, а также реализовано дистанционное управление системами электропитания и управления.

Основные технические и эксплуатационные параметры созданной ионно-плазменной установки представлены в таблице 5.

В главе также описана созданная опытно-промышленная технологическая установка генерации газовых пучково-плазменных образований ИПУ-1 для ионно-плазменного упрочнения поверхности сталей и сплавов с полым катодом протяженной геометрии длиной 1,2 м и диаметром 0,6 м. Схема установки и внешний вид установки приведены на рисунке 27.

На основе полученных результатов комплексных фундаментальных научных исследований разработаны оптимальные технологические режимы ионно-плазменного азотирования ряда промышленно выпускаемых пуансонов. При этом срок службы пуансонов для холодного прессования деталей возрос в нескольких раз по сравнению с пуансонами, обработанными по традиционной технологии закалки.

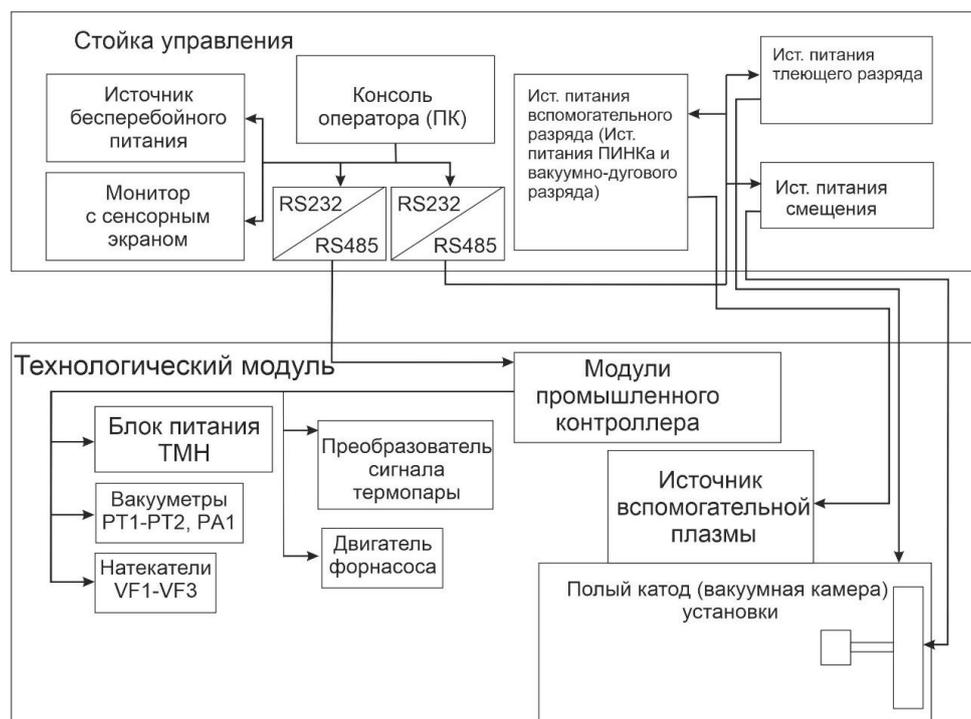


Рисунок 26 – Блок-схема ионно-плазменной установки

Таблица 5 – Технические и эксплуатационные параметры ионно-плазменной установки для обработки поверхности материалов и изделий в газовых ППО

Объем газоразрядной камеры (без теплового экрана)	0,2 м ³
Среднее значение концентрации плазмы при токе разряда 100 А, напряжении горения 200 В, $p = 1$ Па	Не ниже 7×10^{11} см ⁻³
Неоднородность радиального распределения концентрации плазмы в отсутствие обрабатываемых изделий относительно среднего значения	Не более ± 30 %
Плотность ионного тока при токе разряда 100 А, напряжении 200 В, $p = 1$ Па	Не ниже 10 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	(45 – 350) В

Ток разряда в постоянном режиме горения разряда	(30 – 100) А
Максимальный импульсный 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
Размер полезной области для загрузки деталей (с тепловым экраном)	350×350×400 мм
Масса обрабатываемых деталей в одной садке	До 60 кг
Максимальная достигаемая температура деталей в садке (с тепловым экраном)	750 °С

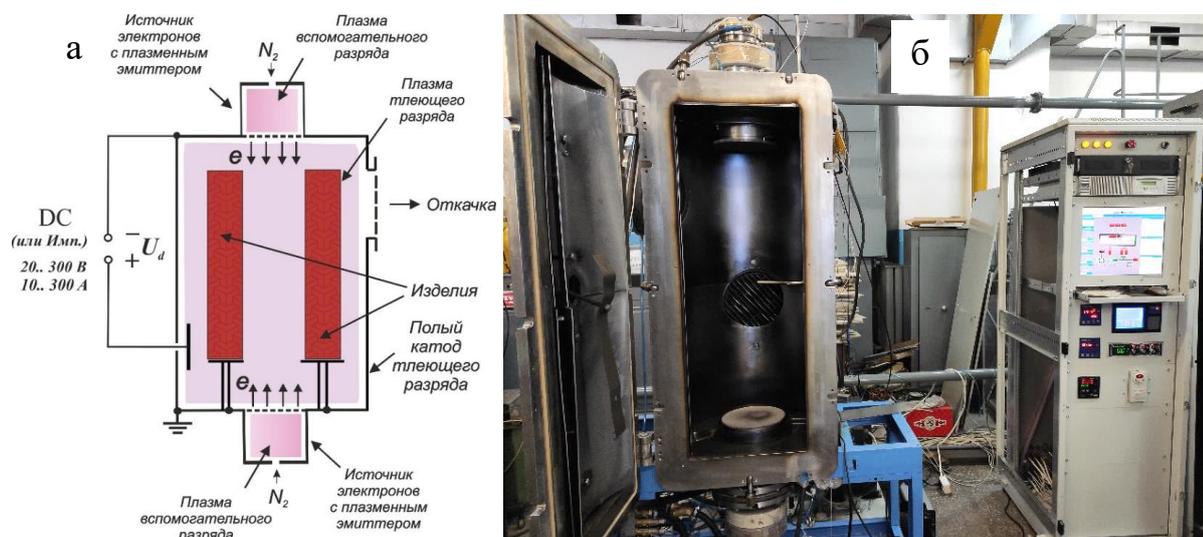


Рисунок 27 – Схема установки генерации ППО с протяженным полым катодом и внешний вид установки генерации ППО «ИПУ-1» с протяженным полым катодом

Созданный генератор низкотемпературной плазмы предназначен для очистки, активации и азотирования поверхности изделий из конструкционных и инструментальных сталей (см. рисунок 28) массой до 150 кг. Время азотирования изделий, например из стали Х12МФ на глубину ≥ 100 мкм, составляет около 11 ч. При этом в отличие от традиционных методов азотирования существует возможность устранения хрупких нитридных фаз на поверхности изделия. Таким образом, созданное оборудование, реализующее процессы ионно-плазменного азотирования сталей, находится на уровне или превосходит по технологическим возможностям существующие аналоги.

Проведенные исследования позволили также разработать и запустить в эксплуатацию установку вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления покрытий на основе газо-металлических ППО для обработки поверхности материалов и изделий. Разработанная установка использовалась для нанесения многослойных композиционных нитридных покрытий системы TiAlN и системы (Zr+TiBSiNi)N на фрезы из твердого сплава ВК-8.



Рисунок 28 – Азотированные пуансоны из штамповых сталей в рабочей камере установки для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом

Все разработанные установки оснащены системами автоматического управления на базе промышленного контроллера и персонального компьютера, позволяющими проводить технологические процессы в автоматическом режиме и исключая переход в запрещённые режимы, способные привести к браку обрабатываемых изделий, поломке установки или избежать ситуаций, связанных с опасностью для жизни и здоровья обслуживающего персонала.

Для электропитания и управления описанных выше систем генерации газовых и газо-металлических ППО были разработаны специализированные импульсные источники электропитания. Всего были разработаны 2 основных типа источников электропитания: источник электропитания тлеющего разряда мощностью 25 кВт и источник электропитания вспомогательного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом мощностью 9 кВт.

Таким образом, на основе нового класса генераторов объемно-однородных пучково-плазменных образований, разработанного в рамках диссертационной работы, создан ряд лабораторных и опытно-промышленных установок для реализации процессов упрочняющей ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий. Демонстрируемые технологические возможности для ионно-плазменного азотирования материалов и изделий превосходят или находятся на уровне существующих мировых аналогов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Предложены, разработаны, апробированы и оптимизированы методики оценки и расчета параметров систем генерации объемно-однородных газовых пучково-плазменных образований, которые на основе набора исходных данных и требований с помощью разработанных шаблонов для реализации автоматизированного расчета в программной среде MathCad позволяют рассчитывать

конфигурацию электродной системы генерации ППО, параметры систем электропитания, а также параметры плазменной среды. Разработанные методики проверены экспериментально и скорректированы при создании нескольких систем генерации газовых технологических и эмиссионных ППО.

2. Показано, что в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом объемом $>0,1 \text{ м}^3$ при низком давлении (0,025 – 0,25 Па) достигается величина импульсных токов до 800 А при напряжении горения разряда до 400 В и длительности импульсов 1 мс. Стабильно формируются пучково-плазменные образования с концентрацией около 10^{12} см^{-3} со степенью ионизации до $\approx 15 \%$. Плотности электронного тока насыщения, извлекаемого на зонд, составляют 3,7 А/см² (0,025 Па), 5 А/см² (0,05 Па) и 6,7 А/см² (0,25 Па), что позволяет использовать такие ППО в качестве эмиссионных для генерации интенсивных электронных пучков и эффективной модификации поверхности материалов и изделий.

3. Установлено, что увеличение тока тлеющего разряда до нескольких сотен ампер, вызванное увеличением тока инжектированных электронов через эмиссионный электрод, в системе с одним источником электронов приводит к плавному снижению степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц в протяженном цилиндрическом полой катоде длиной 1,2 м и диаметром 0,6 м с нескольких десятков процентов до $\pm 10 \%$.

4. Результаты численного моделирования с использованием двух моделей и их сравнение с результатами экспериментов показывают, что первая модифицированная модель тлеющего разряда на основе соотношений для диффузии электронов, плотности объемного заряда и уравнения Пуассона отражает основные закономерности влияния рабочих параметров на процессы генерации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях в несамостоятельном тлеющем разряде в разрядной области полого катода большого объема и применима для прогнозирования хода основных характеристик несамостоятельного тлеющего разряда и зависимости концентрации плазмы от различных рабочих параметров. Вторая модель, основанная на законе непрерывности тока, учитывает осцилляцию электронов в катодной полости несамостоятельного тлеющего разряда и относительно корректно описывает процессы генерации в ней заряженных частиц и распределение концентрации заряженных частиц в полой катоде.

5. Установлено, что в осесимметричной цилиндрической системе генерации газового пучково-плазменного образования на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инъекцией электронов из двух источников электронов, расположенных на верхнем и нижнем основаниях полого катода, с высокой достоверностью действует принцип суперпозиции при токах тлеющего разряда порядка 100 А и концентрациях заряженных частиц до $\leq 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшее увеличение тока тлеющего разряда ($> 100 \text{ А}$) вплоть до 200 А за счет увеличения общего электронного тока инъекции до $\approx 40 \text{ А}$, при которых степень ионизации плазменного образования составляет около 1% и более, а концентрация заряженных частиц около $(6 - 8) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, показало, что степень невыполнения принципа суперпозиции распределений концентраций заряженных частиц возрастает.

6. Разработан, создан и запущен генератор газовых ППО на основе оригинальной формы несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом объемом $\approx 0,3 \text{ м}^3$ протяженной формы (отношение диаметра к длине – 1:2) с

протяженным полым цилиндрическим сетчатым плазменным эмиттером электронов на основе вспомогательного дугового разряда низкого давления. Генератор позволяет генерировать протяженные (≥ 1 м длиной) газовые пучково-плазменные образования в широком диапазоне рабочих параметров. В результате влияния встречных потоков ионов из плазмы тлеющего разряда на плазму дугового разряда и потока электронов из дугового разряда на плазму тлеющего разряда неоднородность распределения концентрации заряженных частиц в обоих ППО снижается.

7. Установлено, что в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом при низком давлении реализуется возможность варьирования концентрацией заряженных частиц в ППО в диапазоне ($10^9 - 10^{12}$) см^{-3} в стационарном и импульсно-периодическом режимах, что позволяет с высокой частотой, до нескольких килогерц, изменять ширину прикатодного падения потенциала в несколько раз, увеличивать плотность потока ионов на поверхность труднодоступных областей изделий, и проводить качественную ионно-плазменную обработку всей поверхности изделий сложной формы. Показано, что использование импульсно-периодического режима горения разряда позволило снизить неоднородность толщины азотированного слоя шестерен из конструкционной стали с мелким модулем зуба в нескольких раз.

8. Выявлены закономерности эволюции фазового состава, структуры азотированного слоя инструментальной стали 4X5МФС, сформированного после обработки в азотосодержащей плазме для различного содержания азота в рабочей смеси, проведен анализ физико-механических свойств поверхности модифицированного материала. Определено, что содержание азота в азот-аргоновой рабочей смеси играет определяющую роль в формировании фазового состава поверхностного слоя при азотировании. Наилучшие триботехнические свойства поверхности азотированного слоя на штамповой стали 4X5МФС обеспечивает режим азотирования в смеси $\text{N}_2(10\%)+\text{Ar}(90\%)$, в которой не формируются хрупкие фазы $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ и $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$.

9. Газо-металлические пучково-плазменные образования, формируемые при низком давлении, перспективны в процессах нанесения композиционных многослойных, многокомпонентных функциональных покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом.

10. Разработаны и апробированы специализированные импульсные источники электропитания для систем и установок генерации газовых и газо-металлических ППО. Пройдены стадии разработки и уточнения технического задания на основные типы систем электропитания с выходной мощностью до 25 кВт, разработаны отдельные узлы и источники электропитания в целом. Применяемые схемотехнические решения обеспечивают стабильное горение сильноточного тлеющего разряда с полым катодом в стационарном и импульсно-периодическом режимах от долей до нескольких сотен ампер. Созданные источники электропитания используются для реализации технологических процессов ионно-плазменной обработки материалов и изделий.

11. Исследования закономерностей генерации пучково-плазменных образований в полых катодах большого объема, разработка генераторов газовых и газо-металлических ППО, а также импульсных источников электропитания позволила создать на их основе ряд экспериментальных и опытных технологических установок для реализации процессов ионно-плазменной обработки методами ионно-

плазменного азотирования и плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления с полыми катодами объемом (0,2 – 0,3) м³.

12. Разработана, изготовлена и запущена в эксплуатацию установка для обработки поверхности материалов и изделий в объемно-однородных газовых ППО с размером полезной области для загрузки деталей 350×350×400 мм и максимальной массой садки до 60 кг. Разработанная установка использовалась для азотирования ряда промышленных изделий из различных конструкционных и инструментальных сталей массой. После обработки изделия имеют срок службы в 3 – 4 раза больший, чем без обработки или после закалки.

13. Разработана, изготовлена и запущена в эксплуатацию установка ИПУ-1 для обработки поверхности материалов и изделий в объемно-однородных газовых ППО с размером полезной области для загрузки деталей ($D \times h$) – (1200×600) мм и максимальной массой садки до 150 кг. На установке успешно реализуются технологические режимы ионно-плазменного азотирования инструментальных сталей 4Х5МФС, Х12, Х12М, Х12МФ, Х6ВФ, при низком (около 1 Па) давлении в газовом ППО в азотно-аргоновой газовой смеси, приводящие к кратному повышению срока службы обработанных изделий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

1. Generation of Plasma with Increased Ionization Degree in a Pulsed High-Current Low-Pressure Hollow Cathode Discharge / V. V. Yakovlev, **V. V. Denisov**, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63 – P. 1757–1765.

(Русскоязычный вариант: Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом / В. В. Яковлев, **В. В. Денисов**, Н. Н. Коваль [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 109–116.)

2. Generation of uniform low-temperature plasma in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode / **V. V. Denisov**, Y. N. Akhmadeev, N. N. Koval [et al.] // Plasma Physics Reports. – 2017. – Vol. 43, N 1. – P. 67–74.

(Русскоязычный вариант: Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади / **В. В. Денисов**, Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль [и др.] // Физика плазмы. – 2017. – Vol. 43, N 1. – P. 7–14.)

3. Plasma Generation in a Pulsed Mode of a Non-Self-Sustained Arc Discharge with a Hybrid Hot-and-hollow Cathode / **V. V. Denisov**, Y. K. Akhmadeev, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, N 3. – P. 541–546.

4. Non-Self-Sustained Hollow-Cathode Glow Discharge at Low Burning Voltages / **V. V. Denisov**, Y. K. Akhmadeev, N. N. Koval [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, N 4. – P. 563–568.

5. 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, Yu. A. Denisova [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, N 7. – P. 1147–1153.

6. 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, N 10. – P. 1735–1742.

7. Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure / **V. V. Denisov**, Yu. A. Denisova, E. L. Vardanyan [et al.] // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, N 1. – P. 145–150.

8. Influence of Conditions of the Electric Arc Discharge Burning on the Size of Microdroplet Fraction in a Nitride Coating / M. V. Savchuk, **V. V. Denisov**, Yu. A. Denisova [et al.] // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 64. – P. 2155–2161.

*(Русскоязычный вариант: Влияние условий горения электродугового разряда на размер микрокапельной фракции в нитридном покрытии / М. В. Савчук, **В. В. Денисов**, Ю. А. Денисова [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 11. – С. 158–163.)*

9. Influence of the Discharge Burning Conditions on Distributions of the Parameters of Plasma Generated in a Non-Self-Sustaining Glow Discharge Inside a Hollow Cathode / D. Yu. Ignatov, S. S. Kovalsky, **V. V. Denisov** [et al.] // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 64. – P. 2170–2176.

*(Русскоязычный вариант: Влияние условий горения разряда на распределения параметров плазмы, генерируемой в несамостоятельном тлеющем разряде внутри полого катода / Д. Ю. Игнатов, С. С. Ковальский, **В. В. Денисов** [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 11. – С. 171–176.)*

10. 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, N 1. – P. 141–149.

11. 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, N 1. – P. 150–155.

12. Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Coatings Obtained by the Vacuum-Arc Sputtering of Ti–B–Si–Ni Cathodes Manufactured Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Pressing / V. M. Savostikov, A. A. Leonov, **V. V. Denisov** [et al.] // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17, N 3. – P. 681–686.

*(Русскоязычный вариант: Исследование физико-механических свойств покрытий, полученных вакуумно-дуговым распылением катодов состава Ti–B–Si–Ni, изготовленных с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и прессования / В. М. Савостиков, А. А. Леонов, **В. В. Денисов** [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 6. – С. 60–66.)*

13. Physical and mechanical properties of multicomponent (Zr+TiBSiNi)N coating fabricated by plasma-assisted vacuum-arc deposition / V. M. Savostikov, A. A. Leonov, **V. V. Denisov** [et al.] // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 66, N 11. – P. 1173–1179.

14. Electron-ion-plasma equipment for modification of the surface of materials and products / N. N. Koval, Yu. Kh. Akhmadeev, **V. V. Denisov** [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, N S2. – P. S294–S300.

15. On the Low-Temperature Complex Surface Modification of Titanium Alloys // A. A. Nikolaev, A. Yu. Nazarov, E. L. Vardanyan, R. Sh. Nagimov, **V. V. Denisov** //

Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2022. – Vol. 16. – P. 977–982.

(Русскоязычный вариант: Низкотемпературное комплексное модифицирование поверхности титановых сплавов / А. А. Николаев, А. Ю. Назаров, Э. Л. Варданян, Р. Ш. Нагимов, В. В. Денисов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 11. – С. 57–62.)

16. Comparison of Properties of the ZrN Mononitride Coating and (Zr + Ti–B–Si–Ni)N Multicomponent Coating Obtained by Vacuum-Arc Plasma-Assisted Deposition / A. A. Leonov, V. N. Savostikov, V. V. Denisov [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17, N 1, suppl. – P. S43–S50.

17. 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, Y. H. Akhmadeev, N. N. Koval [et al.] // Phys. Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – P. 123510.

18. Low-temperature plasma source based on a cold hollow-cathode arc with increased service life / V.V. Denisov, Y. H. Akhmadeev, N. N. Koval, E. V. Ostroverkhov // HTMP. – 2016. – Vol. 20, N 4. – P. 309–316.

19. Nitriding of commercial pure titanium in the plasma of frequency-pulsed non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode at low pressure / Y. F. Ivanov, A. P. Laskovnev, V.V. Denisov [et al.] // High Temperature Materials Processes. – 2017. – Vol. 21, N 1. – P. 13–23.

20. Generation of Plasma in Non-Self-Sustained Glow Discharge With Hollow Cathode for Nitriding Inner Surfaces of Elongated and Complex Shaped Cavities / D. Yu. Ignatov, I. V. Lopatin, V. V. Denisov [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2020. – Vol. 48, N 6. – P. 2050–2059.

21. Structure and Properties of CrN/TiN Multi-Layer Coatings Obtained by Vacuum-Arc Plasma-Assisted Deposition Method / A. A. Leonov, Yu. A. Denisova, V. V. Denisov [et al.] // Coatings. – 2023. – Vol. 13, N 2. – P. 351.

Патенты:

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

2. Патент № 2776247 Российская Федерация. Способ определения жаростойкости функциональных покрытий на инструментальных и конструкционных материалах с использованием синхротронного излучения : заявл. 13.12.2021 / Денисов В. В., Денисова Ю. А., Варданян Э. Л., Леонов А. А., Назаров А. Ю., Шмаков А. Н., Яковлев В. В.

3. Патент № 2736288 Российская Федерация. Способ восстановления рабочей металлокерамической поверхности деталей и изделий : заявл. 28.05.2020 / Денисов В. В., Овчаренко В. Е., Тересов А. Д., Иванов К. В., Коваль Н. Н.

4. Патент № 2725788 Российская Федерация. Устройство для поверхностной обработки металлических и металлокерамических изделий : заявл. 17.12.2019 / Денисов В. В., Коваль Н. Н., Девятков В. Н., Москвин П. В., Тересов А. Д.