

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы (диссертации) на тему:
**«Создание однородной газометаллической плазмы в больших вакуумных объёмах
для модификации поверхности материалов»**

Направление подготовки: 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи
Профиль подготовки (специальность): 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

Аспирант



Игнатов Данил Юрьевич

Научный руководитель:

Коваль Николай Николаевич,

д. т. н., профессор

г. н. с. ИСЭ СО РАН

Обоснование актуальности темы научного исследования

Улучшение эксплуатационных характеристик изделий и изменение свойств металлов и сплавов наиболее актуальная задача в различных отраслях промышленности и научных исследований. Решается данная задача не новым, но активно развивающимся и одним из самым прогрессивным и по сей день способом – ионно-плазменной обработкой. Ионно-плазменная обработка – это высокотехнологический процесс, при котором происходит химико-термическая обработка тонкого слоя поверхности материала, путём внедрения в поверхностный слой атомов химических элементов (N_2 , O_2 , C и др.) или осаждение на рабочую поверхность тонких плёнок на основе тугоплавких металлов (Ti, Cr, Mo и др.), а также комбинирование этих методов для синтеза многослойных износостойких покрытий на поверхности материалов и изделий. После ионно-плазменной обработки такие изделия способны работать в более тяжёлых условия (высокая температура, химически агрессивные среды, повышенный износ материала), и срок службы таких деталей кратно увеличивается.

Для реализации данного способа обработки используются вакуумно-плазменные технологии, где главной задачей является создание плотной и однородной плазмы, генерация которой осуществляется с помощью разрядов различных типов.

Задача модификации внешней поверхности металлических изделий ионно-плазменными методами успешно решается различными методами в последнее время, однако, ионно-плазменная обработка внутренних поверхностей полостей остается технологически наиболее сложно реализуема. Данная научная работа посвящена расширению возможности ионно-плазменных методов обработки внутренней поверхности протяжённых металлических полостей в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. Использование такой плазмы при пониженных давлениях (до 1 Па и ниже) позволяет эффективно проводить химико-термическую обработку поверхности различных марок сталей, что приводит к более быстрым процессам ионно-плазменной обработки поверхностей материалов без использования взрывоопасных водородосодержащих газов (H_2 , NH_3), в отличие от процесса обработки при использовании классического тлеющего разряда, который генерирует плазму при более высоких давлениях ~ 100 Па, что не позволяет реализовывать все преимущества ионно-плазменной обработки.

Процесс генерации плазмы несамостоятельного тлеющего разряда и взаимодействия такой плазмы с поверхностью обрабатываемых материалов является совокупностью сложных физических процессов, требующих тщательного исследования для получения ценной, практически важной информации для последующего её использования в прикладных задачах, чему и посвящена настоящая работа.

Цель научной работы: выявление и изучение основных условий, влияющих на однородность генерации плазмы несамостоятельного тлеющего разряда в металлических полостях протяжённой и сложной формы для химико-термической обработки внутренней поверхности металлических изделий.

Основные задачи научного исследования:

1. Изучение научной литературы в отечественных и зарубежных периодических изданиях по методам генерации низкотемпературной плазмы во внутренних полостях металлических изделий протяжённой и сложной форм с целью ионно-плазменной обработки внутренней поверхности и постановка задач исследований.

2. Разработка, создание и последующая модификация разрядной системы, которая является основным узлом экспериментального стенда, для исследования низкотемпературной плазмы, генерируемой с помощью несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом протяжённой и сложной форм длиной 300 мм и внутренним диаметром 25 мм при напряжении горения основного разряда до 250 В и при давлении рабочего газа до 1 Па.

3. Исследование основных характеристик изучаемого несамостоятельного тлеющего разряда:

- изучение зависимости тока основного разряда от параметров и условий горения основного разряда (напряжение, давление, ток вспомогательного разряда «PINK»);
- определение влияния основных параметров разряда на распределение температуры вдоль полого катода;
- изучение распределения плотности ионного тока вдоль внутренней полости полого катода от основных параметров разрядной системы.

Обобщение полученных результатов по исследованию несамостоятельного тлеющего разряда для построения физической модели основных процессов, влияющих на однородность генерации плазмы во внутренней полости, протяжённой и сложной форм.

4. Для реализации прикладной задачи по использованию данного типа разряда с целью ионно-плазменной химико-термической модификации поверхности внутренней полости: проведение процесса азотирования, измерение твёрдости азотированного слоя и определение однородности толщины модифицированного слоя.

Содержание выполненного исследования с описанием использованных методов, и его основные результаты (по разделам, соответствующим основным задачам исследования)

1 глава. Литературный обзор

Модификация поверхности ионно-плазменными химико-термическими методами активно изучается и развивается в последнее время в науке и технике [1, 2]. Для этой цели создаются и изучаются различные газоразрядные системы генерации низкотемпературной плазмы. Задача модификации наружных поверхностей металлических изделий ионно-плазменными методами успешно решается при давлениях (0.6 – 1) Па [3-6]. Однако, обработка внутренних поверхностей полостей диаметром до ≈ 30 мм в таких разрядных системах остается технологически сложно реализуемой, вследствие образования катодного слоя, достигающего в ширину 10 мм и более, и препятствующего распространению плазмы внутрь протяжённой полости. Существуют газоразрядные системы, которые позволяют проводить обработку внутренней поверхности протяжённых изделий в плазме аномального тлеющего разряда с коаксиально расположенным анодом [7, 8], и с помощью протяжённого источника RF-плазмы, размещённого внутри цилиндрической полости [9-11]. Недостаток данных систем в том, что обрабатываемые изделия должны иметь только прямолинейную форму из-за коаксиально расположенных электродов, которые закрепляются на торцах цилиндрических полостей, а также это ограничивает минимальный внутренний диаметр обрабатываемых изделий, который не может быть меньше диаметра внутренних коаксиальных электродов.

Также существуют методы генерации плазмы внутри полости при наружном расположении анода [12]. В данных системах цилиндрическая полость является полым катодом тлеющего разряда, горящего при давлениях (10 – 200) Па, а анодом является электрод, расположенный вблизи торца полости. В такой разрядной системе всегда наблюдается локализация разряда на небольшом расстоянии от торца полости, приближенного к аноду. Распределение плотности тока сильно неоднородно и спадает практически до нуля на расстоянии равном ≈ 20 -ти диаметрам трубки. Такое горение разряда создаёт температурный градиент и приводит к ограничению максимальной длины области однородной обработки изделия.

В работах [13-15] показана возможность генерации плазмы в длинных протяжённых полостях без использования коаксиально расположенного анода. В таких системах генерация плазмы производилась с помощью аномального тлеющего разряда, где катодом являлась обрабатываемая трубка, а анодом внешние стенки вакуумной камеры. Питание разряда осуществлялось импульсным напряжением с частотой до 100 кГц. После зажигания тлеющего разряда на наружной стенке обрабатываемых трубок, разряд проникал внутрь, с переходом в режим горения с полым катодом, а переход в дуговую стадию горения с катодным пятном предотвращался импульсным характером электропитания разряда. В

данных работах не была изучена возможность ионно-плазменной обработки внутренней поверхности протяжённых полостей сложной формы, а также не стояла цель заполнения таких полостей низкотемпературной плазмой с хорошей однородностью и выявления факторов, оказывающих влияние на распределение температуры стенок обрабатываемых протяжённых полостей.

2 глава. Описание экспериментальной разрядной системы генерации плазмы во внутренних полостях протяжённой и сложной форм

Эксперименты проводились на вакуумной установке, с рабочим объёмом камеры $\approx 0.2 \text{ м}^3$. Откачка камеры производилась турбомолекулярным насосом с производительностью откачки 500 л/с. Данная система откачки позволяла получать предельный вакуум в камере до $3.5 \times 10^{-3} \text{ Па}$, и достигать рабочее давление 1 Па при расходах азота $\approx 2.5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Давление в камере измерялось с помощью вакуумметра Мерадат-ВИТ19ИТ и датчиков ПМТ-6-3М-1 и ПМИ-10-2 (относительная погрешность измерения давления в диапазоне от 10^{-2} Па до 10^1 Па составляет $\pm 35\%$). Для проведения экспериментов по генерации плазмы в протяжённых полостях в вакуумной камере на специальном столике устанавливался цилиндрический полый электрод 1 (рис. 1), играющий роль полого катода.

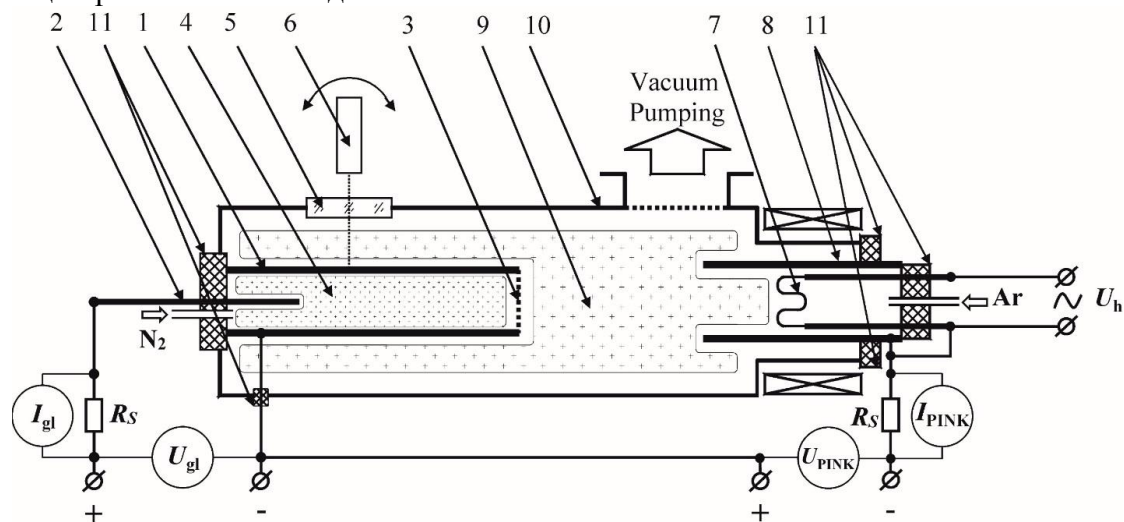


Рисунок 1. Схема двухступенчатой разрядной системы. 1 – полый катод тлеющего разряда (трубка), 2 – штыревой анод тлеющего разряда, 3 – вольфрамовая сетка, 4 – плазма тлеющего разряда, 5 – кварцевое стекло, 6 – пирометр, 7 – накаливаемый катод вспомогательного разряда «PINK», 8 – полый катод вспомогательного разряда «PINK», 9 – плазма вспомогательного разряда «PINK», 10 – вакуумная камера, 11 – изоляторы, U_{gl} – напряжение электропитания тлеющего разряда, U_{PINK} – напряжение электропитания вспомогательного разряда «PINK», U_h – напряжение электропитания накаливаемого катода, R_s – сопротивление измерительного шунта 3.75 мОм, I_{gl} – измерение тока тлеющего разряда, I_{PINK} – измерение тока вспомогательного разряда «PINK».

В процессе исследований для азотирования использовался прямолинейный полый электрод 1, изготовленный из трубки с внутренним диаметром 25 мм толщиной стенок 1.5 мм и длиной 300 мм, а также электрод сложной формы, который был изготовлен из двух таких же трубок длиной 150 мм каждая, сваренных под углом 90°. Материалом трубок в обоих случаях была нержавеющая сталь марки 12X18H10T (Fe – 67%, Cr – (17-19)%, Ni – (9-11)%, Ti – (0.4-1)%, Mn – до 2%, Si – 0.8%, Cu – до 0.3, C – 0.12), аналог AISI 321. Внутренняя поверхность электрода являлась полым катодом основного несамостоятельного тлеющего разряда, а его анодом являлся вольфрамовый стержень 2 диаметром 4 мм, введённый через нижний торец трубки на глубину 40 мм и закреплённый на водоохлаждаемом держателе, через который подавался рабочий газ азот. Для инъекции электронов в полость из плазмы вспомогательного разряда 9 противоположный торец трубки был перекрыт вольфрамовой сеткой 3 с размером ячейки 5×5 мм и толщиной проволоки 0.8 мм, которая вместе с внешней поверхностью электрода 1 являлась анодом для вспомогательного несамостоятельного дугового разряда плазмогенератора с комбинированный накалённым и полым катодом «PINK» 7 [21-23]. Использование вольфрама для изготовления сетки обусловлено тем, что при горении основного разряда на нити сетки приходит ионный ток высокой плотности, который быстро разогревает сетку до температур, превышающих температуру плавления нержавеющей стали. Электроны, пролетая сквозь сетку 3 ускорялись в направлении анода 2, производя ионизацию рабочего газа. Так как внутренняя поверхность электрода 1 является катодом основного разряда, образуя электростатическую ловушку, ускоренные электроны осциллировали в полости до потери своей энергии на неупругих столкновениях с молекулами рабочего газа либо ухода на анод 2.

Использование плазмогенератора «PINK» обусловлено возможностью поддержания горения его разряда в широком диапазоне давлений (0.05 – 2) Па и плавной регулировки разрядного тока от 0.1 А до 100 А в непрерывном режиме без образования катодного пятна [21]. В экспериментах по исследованию характеристик основного разряда и проведению процессов по ионно-плазменной обработке в полый электрод 1 производилась подача азота, а для более стабильного горения вспомогательного разряда в плазмогенератор «PINK» производился напуск аргона. В ходе исследования характеристик разряда одновременно производилось измерение температуры на наружной поверхности трубок по 5 точкам на расстоянии 55 мм друг от друга. Температура контролировалась через кварцевое стекло 5 пирометром 6 марки Kelvin ARTO 1300 А, закреплённым на подвижном кронштейне, с возможностью изменения точки измерения локальной температуры.

Электропитание несамостоятельного тлеющего разряда осуществлялось от источника с напряжением до 300 В и током до 20 А с функцией предотвращения образования микродуг и стабилизации выходного тока и напряжения. Электрическое питание плазмогенератора «PINK» осуществлялось от блока питания разряда, обеспечивающего ток разряда от 0.1 А до 100 А при напряжении холостого хода 75 В, накал вольфрамового термокатода осуществлялся блоком питания накала, обеспечивающего переменный ток до 200 А при напряжении до 12 В с частотой 2 кГц. Измерение тока тлеющего разряда и вспомогательного разряда генератора «PINK» производилось с помощью резистора ($R_{ш} = 3.75 \text{ мОм} \pm 0.5 \%$) выполнявшего роль токового шунта (на рисунке 1 он обозначен R_s) методом измерения падения напряжения с помощью электронного мультиметра Victor VC 9805A+ (погрешность измерения при падении напряжения на резисторе до 200 мВ равна $\pm 0.5\%$). Напряжение основного и вспомогательного разрядов так же измерялось с помощью мультиметра Victor VC 9805A+ (погрешность измерения напряжения до 1000 В равна $\pm 1\%$), подключённого параллельно к источникам питания разрядов к клеммам «+» и «-».

Помимо исследования характеристик разряда и температурных зависимостей в данной разрядной системе, были проведены эксперименты по азотированию внутренней поверхности полостей прямолинейной и сложной форм полого катода I . Для этого, с целью определения однородности азотирования по длине полости, в обеих полостях устанавливались по 5 образцов с размерами $\varnothing 6 \times 3$ мм на расстоянии 55 мм друг от друга вдоль оси. Образцы изготавливались из той же стали, что и стенки полого катода и вкручивались в стенки полого катода заподлицо с внутренней поверхностью полости. После азотирования образцы выкручивались из полости, изготавливались их поперечные шлифы, на которых измерялась толщина модифицированного слоя, с помощью оптического микроскопа $\mu\text{Vizo-MET-221}$, и твердость полученного слоя, с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

3 Глава. Исследование основных характеристик несамостоятельного тлеющего разряда

Использование несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом позволяет изменять плотность ионного тока на катоде и, как следствие, температуру обработки изделий за счет изменения тока вспомогательного разряда, обеспечивающего внешнюю инжекцию электронов в основной разряд. Напряжение горения основного разряда при этом не изменяется. Кроме того, использование внешней инжекции электронов, позволило обеспечить горение основного разряда при давлениях в вакуумной камере ≈ 1 Па и напряжении горения основного разряда от 100 В. Рабочее давление измерялось в вакуумной

камере, давление же в катодной полости оценочно превышало давление в рабочей камере на $\approx 10\%$ [24]. Несмотря на низкое напряжение горения разряда (100 – 250) В, была получена сравнительно высокая средняя плотность ионного тока на катоде. Средняя плотность ионного тока на катоде оценивалась по формуле $j_i = (I_{gl} - I_{pink}) / ((1 + \gamma) * S)$ [4, 25], где I_{gl} – ток тлеющего разряда, I_{pink} – ток вспомогательного разряда, γ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии равный ~ 0.07 [25, 26], S – площадь катода, m^2 и составила (30 – 110) A/m^2 . Соответственно, оценки концентрации плазмы, сделанные на основе формулы Бома $j_i = 0,43en\sqrt{(2kT_e/M_i)}$, при $T_e \approx 1$ эВ (взята характерная величина для тлеющих разрядов с внешней инжекцией электронов [4]) составила $(1.5 - 5.4) \times 10^{17} m^{-3}$. В этих условиях ширина катодного слоя в полости, составила (1 – 0.5) мм, что в несколько раз ниже величин, характерных для классических тлеющих разрядов [27] и, соответственно, улучшает условия токопрохождения в основном разряде внутри трубки. При этом, характерная длина свободного пробега электрона (ускоренного в катодном слое основного разряда), оцененная по формуле: $\lambda_e = 1/n\sigma$, где $n = p/kT$, (σ – сечение неупругого рассеяния электрона на молекуле азота (при энергии электрона ≈ 200 eV, $\sigma = 2.5 \times 10^{-20} m^2$), p – давление газа, k – постоянная Больцмана, T – температура газа) составляет ~ 0.5 м, что сопоставимо с длиной полокатодного электрода и, в свою очередь, позволяет распространиться области горения основного разряда на всю длину полости, предотвращая его локализацию вблизи анода.

Использование сетки на противоположном от анода торце трубки позволяет стабилизировать границу плазмы вспомогательного разряда и не допустить его замыкания на вольфрамовый штыревой анод до зажигания основного разряда. В установившемся режиме горения основного разряда сетка не является границей раздела плазмы основного и вспомогательного разрядов, вследствие того, что размер ячейки сетки превышает 2 ширины катодного слоя основного разряда. В результате плазма тлеющего разряда выходит за пределы сетки, формируя яркое сферическое плазменное образование, ограниченное двойным слоем на границе раздела плазмы основного и вспомогательного разрядов (пунктирная линия вблизи верхнего торца трубки рис. 2 а, б).

Форма области свечения, ее размер и характер границ зависели от напряжения горения, тока основного разряда и рабочего давления. При малом напряжении горения ~ 100 В, область интенсивного свечения вблизи выхода полости имела форму половины вытянутого эллипсоида вращения с диаметром примерно равным диаметру трубки, увеличение напряжения горения основного разряда приводило к изменению области свечения и приобретения ею шарообразной формы, с постепенным увеличением диаметра.

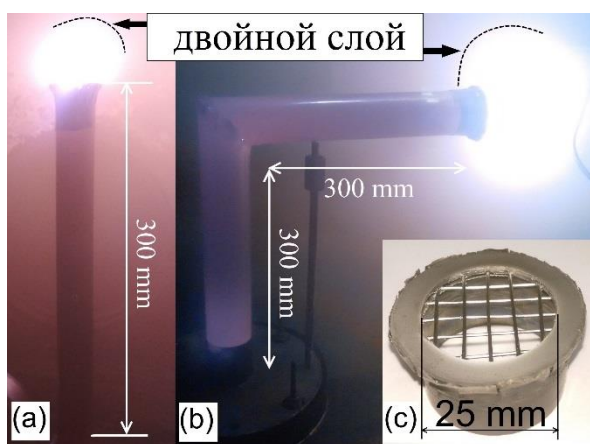


Рисунок 2. Фотографии полых катодов прямолинейной формы (а), сложной формы (б) и вольфрамовой сетки (с).

3.1 Исследование основных параметров разрядной системы

Общее давление в системе устанавливалось путём подачи Ar через плазмогенератор “PINK” до 0.1 Па, далее в полый катод основного разряда подавался N₂ до установления заданного давления рабочего газа. Таким образом, увеличение рабочего давления осуществлялось за счет увеличения парциального давления азота, это приводило к снижению доли аргона с 50% при $p = 0.2$ Па, до 10% при $p = 1$ Па. Увеличение рабочего давления, приводило к уменьшению тока основного разряда (рис. 3).

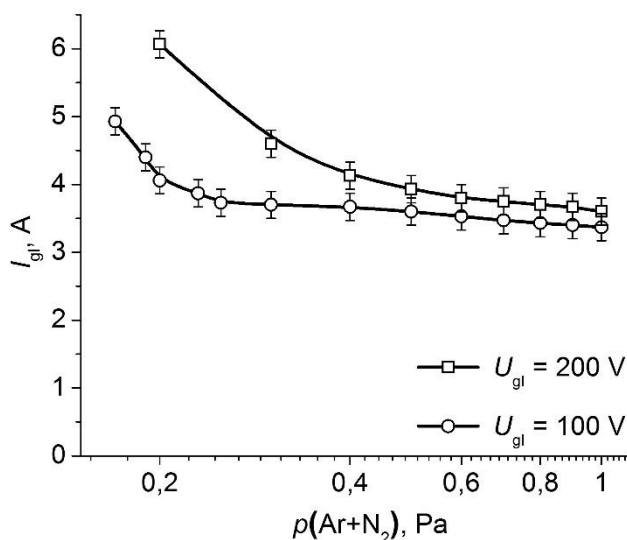


Рисунок 3. Зависимость тока основного разряда I_{gl} от давления $p(\text{Ar+N}_2)$, при постоянном напряжении тлеющего разряда $U_{gl} = 100$ В и $U_{gl} = 200$ В, и при постоянном токе вспомогательного разряда $I_{\text{PINK}} = 2$ А.

Это может объясняться тем, что электроны, извлеченные из вспомогательного разряда, попадают в область существования основного разряда вне полого катода

ограниченную двойным электростатическим слоем, замыкающим электростатическую ловушку, образованную полым катодом (трубкой) (рис. 2 а и б). Инжектированные электроны осциллируют в этой области проводя ионизацию газа, теряя при этом часть своей энергии, а также хаотизируя направление своего движения еще до попадания в полый катод. Ионы, образованные в этой области, уходят в плазму вспомогательного разряда через двойной электростатический слой, не попадая на стенки трубки и, соответственно, не инициируя появления вторичных γ -электронов, но замыкая дополнительный ток в цепи вспомогательного разряда. В условиях стабилизации тока вспомогательного разряда путем регулировки тока накала генератора плазмы, это приводит к снижению тока инжектированных в основной разряд электронов, которое, в свою очередь, приводит к дополнительному снижению тока основного разряда. Увеличение давления приводит к увеличению количества ионизаций, производимых каждым инжектированным электроном, особенно в области, ограниченной двойным электростатическим слоем вне трубки.

Вторым фактором, влияющим на снижение тока основного разряда при увеличении давления, может быть снижение влияния эффекта электростатической ловушки для электронов внутри полого катода [28]. Этот эффект проявляется, когда быстрые электроны из плазмы многократно проникают в катодный слой, производя в нём ионизацию газа и создавая дополнительные электроны, которые затем ускоряются до энергии, соответствующей потенциалу точки пространства в катодном слое (относительно потенциала плазмы), где была произведена ионизация. Для достижения максимальной эффективности работы ловушки необходимо соблюдение двух условий. Первое – это превышение средней длины свободного пробега быстрых электронов (λ) над шириной электростатической ловушки ($4V/S_c$, где V – объём ловушки (для оценок брался объём ограниченный полым катодом, без учета области, ограниченной двойным электростатическим слоем, S_c – площадь ограничивающая ловушку (бралась площадь внутренней поверхности катода)) - $\lambda > 4V/S_c$. Второе условие – это превышение длины электростатической ловушки ($4V/S_0$, где S_0 – площадь поверхности через которую уходят электроны из ловушки, например на анод) над длиной пути электрона до полной потери им энергии на ионизирующих столкновениях $((eU_c/W)\lambda$, где U_c – катодное падение потенциала тлеющего разряда, W – энергия ионизации газа, под которой понимается средняя энергия затрачиваемая одним электроном для образования одной ион – электронной пары, для оценок бралась равной удвоенному потенциалу ионизации азота) - $4V/S_0 > \lambda(eU_c/W)$. При соблюдении этих условий существует диапазон рабочих давлений в котором самостоятельный разряд с полым катодом горит при минимальном и неизменном напряжении горения, а быстрые электроны, ускоренные в катодном слое разряда,

максимально эффективно расходуют практически всю свою энергию на ионизацию газа. Приведенные соображения основываются на равномерном распределении плотности тока быстрых электронов по внутренней поверхности полого катода (изотропности эмиссии первичных электронов в полый катод) и справедливы для самостоятельной формы разряда. В исследуемой разрядной системе при горении несамостоятельного разряда, изотропность эмиссии первичных электронов нарушается за счет внешней эмиссии электронов из вспомогательного разряда. Тем не менее, указанные выше факторы оказывают свое влияние на основные параметры исследуемого разряда. Так, ширина ловушки составила $4V/S_c \approx 0.025$ м, а расчётная средняя длина свободного пробега электрона в диапазоне давлений (0.2 – 1) Па, напряжении горения исследуемого разряда 200 В, температуре газа внутри трубки $\approx 500^\circ\text{C}$, изменялась в пределах (2.2 – 0.5) м, соответственно. Следовательно, первое условие существования эффекта электростатической ловушки выполняется. Выполнение этого условия указывает на то, что электрон при однократном прохождении через плазму в катодной полости практически не будет терять свою энергию на ионизацию газа и глубина его проникновения в катодный слой будет максимальна. В катодном слое такой электрон способен неоднократно произвести ионизацию, и создать дополнительные быстрые электроны, ускоренные при прохождении части катодного слоя. Во всем диапазоне исследованных давлений длина свободного пробега электрона превышает ширину электростатической ловушки на порядок и более, соответственно, изменение давления в приведенном диапазоне не оказывает существенного влияния на способность ускоренных электронов проводить ионизацию в катодном слое основного разряда.

В исследуемом тлеющем разряде длина пути электрона до полной потери энергии на неупругих столкновениях $(eU_c/W)\lambda$ при давлениях (0.2 – 1) Па составляет (15 – 3) м, соответственно, а длина ловушки $4V/S_0$ составляет ≈ 1.2 м. Из этого следует, что условие $4V/S_0 > (eU_c/W)\lambda$ не выполняется, и, следовательно, электроны в целом неэффективно расходуют свою энергию на ионизацию и возбуждение газа до ухода на анод и разогревают его. В экспериментах по исследованию горения тлеющего разряда при давлениях до ≈ 0.3 Па на конце вольфрамового анода наблюдалось оплавление, что свидетельствует о его разогреве до температур свыше $\approx 3400^\circ\text{C}$. Однако этот эффект не наблюдался при увеличении давления.

На графике ВАХ основного разряда видно (рис. 4), что при увеличении напряжения горения основного разряда происходит слабый линейный рост его тока. Линейный характер зависимости тока разряда от напряжения его горения, свидетельствует о том, что основную долю ионизаций внутри трубки производят инжектированные из вспомогательного разряда

электроны. Электроны же, полученные на стенках катода в результате ионно-электронной эмиссии, играют меньшую роль в генерации плазмы. Оценки показывают, что при коэффициенте $\gamma = 0.07$, соответствующем напряжению горения разряда ≈ 200 В и токе вспомогательного разряда 3 А (при 100% -ном извлечении из него электронов), ток электронов, полученных в результате ионно-электронной эмиссии с поверхности катода ≈ 0.2 А. То есть ток инжектированных электронов превышает ток γ - электронов более чем на порядок. Рост напряжения горения основного разряда в 2.5 раза со 100 В до 250 В, (при этом энергия инжектированных из вспомогательного разряда электронов должна увеличиваться на величину равную ≈ 10 потенциалам ионизации азота), сопровождается ростом тока основного разряда всего лишь на $\sim 10\%$, а также ростом линейных размеров светящейся области, к сожалению не измеренному инструментально. Такое незначительное изменение тока при увеличении напряжения горения основного разряда при данном давлении (0.7 Па), как уже указывалось выше, вероятно, связано с увеличением доли энергии, затраченной инжектированными электронами в светящейся области вне стенок полого катода за счет увеличения объема этой области. При этом рост линейных размеров светящейся области, а значит ее объема и площади поверхности, приводит к росту тока ионов, уходящих на стенки вакуумной камеры и снижению тока инжектированных электронов.

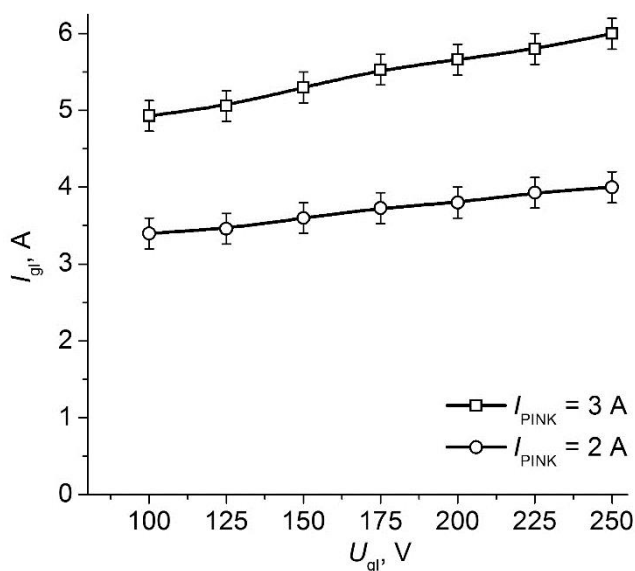


Рисунок 4. Зависимость тока основного разряда I_{gl} , от напряжения его горения U_{gl} , при давлении $p(\text{Ar}+\text{N}_2) = 0.7$ Па и токах вспомогательного разряда $I_{PINK} = 2$ А и $I_{PINK} = 3$ А.

ВАХ основного разряда, полученные при 0.7 Па (рис. 4) и разных токах вспомогательного разряда, хорошо согласуются для всего диапазона напряжений (100-250) В и дополняют зависимости тока основного разряда от рабочего давления (рис. 3), которые

свидетельствуют о том, что при уменьшении давления от 1 Па до 0.2 Па зависимость тока основного разряда от напряжения его горения должна усиливаться. Так, из графиков зависимости тока основного разряда от рабочего давления (рис. 3) видно, что при давлении 0.2 Па и увеличении напряжения основного разряда со 100 В до 200 В наблюдается увеличение тока основного разряда с 4 А до 6 А (в полтора раза), а при более высоком давлении 0.7 Па, такое же увеличение напряжения горения основного разряда приводит к росту его тока с 3.5 А до 3.8 А (менее 10 %). Более существенная зависимость тока основного разряда от напряжения его горения при малых рабочих давлениях, вероятно, связана со снижением частоты столкновений инжектированных электронов с газом в области интенсивного свечения за пределами трубки вследствие снижения давления в рабочей камере и, соответственно, с увеличением доли ионизаций, произведённых быстрыми электронами в самой трубке при увеличении напряжения основного разряда.

При всех исследованных напряжениях горения основного разряда график зависимости его тока от тока вспомогательного разряда имеет линейный характер (рис. 5). Такое поведение тока основного разряда объясняется тем, что при постоянном напряжении его горения и изменении тока вспомогательного разряда коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии остаётся неизменным, а изменение тока разряда происходит за счёт изменения тока электронов, инжектированных из вспомогательного разряда. Данная зависимость подтверждается в исследованиях несамостоятельного тлеющего разряда в больших объёмах при давлениях до 1 Па и напряжении до 300 В [3-6]. Необходимо отметить, что именно эта зависимость (рис. 5) позволяет осуществлять регулировку тока основного разряда без изменения напряжения его горения в несамостоятельном режиме.

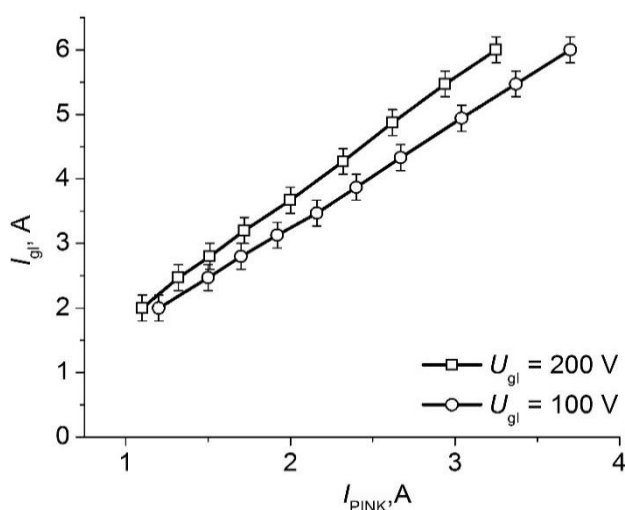


Рисунок 5. Зависимость тока основного разряда $I_{\text{гл}}$ от тока вспомогательного разряда $I_{\text{ПИНК}}$, при постоянных напряжениях горения тлеющего разряда $U_{\text{гл}} = 100 \text{ В}$ и $U_{\text{гл}} = 200 \text{ В}$, и давлении $p(\text{Ar}+\text{N}_2) = 0.7 \text{ Па}$.

Зависимости тока основного разряда при напряжении его горения 100 В и 200 В (рис. 5) подтверждают и дополняют ВАХ основного разряда при токе вспомогательного разряда 2 А и 3 А (рис. 4), полученные во всем исследованном диапазоне напряжения горения основного разряда (100 - 250) В. Кроме того полученные при токе вспомогательного разряда 2 А данные (рис. 5) подтверждают и дополняют газовые зависимости (рис. 3).

3.2 Исследование зависимости распределения вдоль полости температуры от основных параметров разрядной системы

Результаты измерения распределения температуры по длине полости L при трёх различных напряжениях горения основного разряда U_{gl} и различных токах вспомогательного разряда представлены на рис. 6.

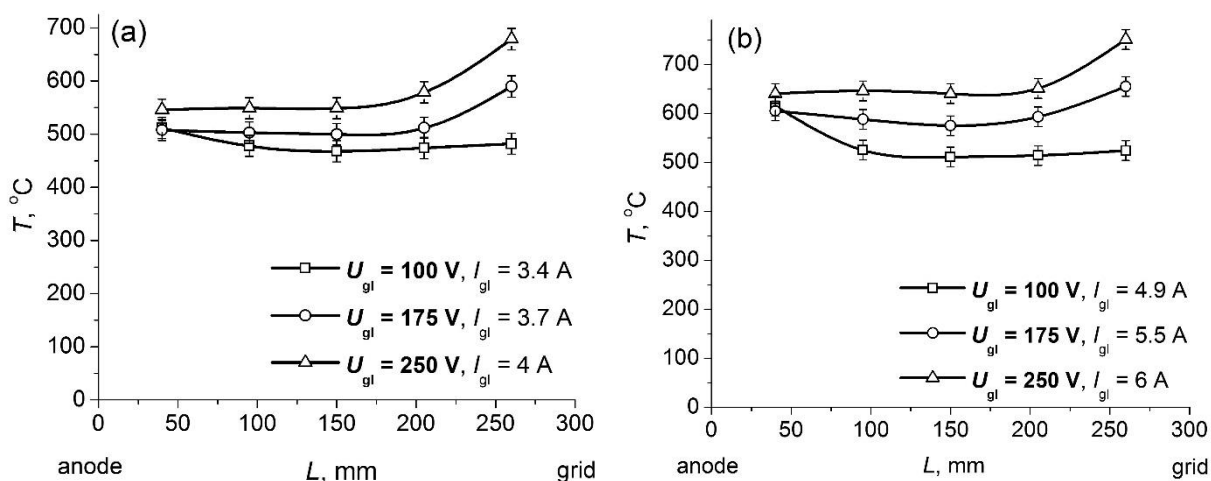


Рисунок 6. Зависимость распределения по длине полости L температуры T при трёх значениях напряжения основного разряда U_{gl} , при давлении $p(\text{Ar}+\text{N}_2) = 0.7 \text{ Па}$ и токах вспомогательного разряда $I_{\text{ПНК}}$: а – 2 А, б – 3 А.

При напряжениях 175 В и 250 В максимальная температура наблюдается вблизи сеточного торца трубки. Это может объясняться увеличением плотности ионного тока, приходящего на стенки катода вблизи этого торца, за счет роста доли энергии, затрачиваемой инжектированными электронами на неупругие столкновения с газом (включая ионизацию) в этой области, при увеличении напряжения горения основного разряда. Такое предположение было подробно объяснено выше, и оно удовлетворительно объясняет не только зависимости тока основного разряда от рабочего давления и напряжения горения основного разряда, но и характер распределения температуры стенок трубки. Локальное увеличение температуры вблизи анода, при напряжении горения основного разряда 100 В, скорее всего, связано с излучением от разогретого анода, которое

становиться заметным на фоне пониженной (по сравнению с предыдущими описанными случаями) температуры стенок трубки. Общее повышение температуры стенок трубки при повышении напряжения горения основного разряда и/или тока вспомогательного разряда объясняется повышением мощности основного разряда выделяемой на стенках трубки за счет увеличения плотности ионного тока, приходящего на них. Изменение тока вспомогательного разряда «PINK» при различных напряжениях не приводит к изменению формы распределения температуры вдоль трубки. Рост температуры происходит пропорционально вкладываемой мощности в каждой точке при 100 В, 175В, 250В, соответственно.

На следующих графиках (рис. 7) представлены результаты исследования распределения температуры по длине полого катода в зависимости от давления газовой смеси, при двух различных напряжениях горения основного разряда. Полученные результаты хорошо объясняются в рамках приведенного выше предположения о влиянии доли энергии инжектированных из вспомогательного разряда электронов, выделяемой в светящейся области вблизи сеточного торца трубки за пределами полого катода. Так, при малых давлениях (0.17 – 0.3) Па для обоих напряжений горения основного разряда, инжектированные электроны, вероятно, не успевают потерять энергию в светящейся области вне полого катода (которая при таких давлениях имеет не четкие границы) и доля выделенной энергии электронов (в том числе на ионизацию газа) внутри трубки увеличивается, причем интенсивность ионизации газа спадает по мере удаления от сеточного торца. Это приводит к значительному искривлению распределения температуры стенок и росту тока основного разряда, фиксируемого в соответствующей цепи (см. рис. 3) и, соответственно, общему росту энергии, выделяемой на стенках трубки и их температуры. Вероятной причиной улучшения однородности распределения температуры по длине полости при повышении рабочего давления является увеличение эффективности утилизации энергии электронов, инжектированных из вспомогательного разряда, в упомянутой области горения основного разряда вне трубки. При увеличении давления (выше 0.3 Па) эта область приобретает более четкие контуры и увеличивается в размерах. Помимо подробно описанных выше эффектов, приводящих к росту тока ионов, не попадающих на стенки трубки и соответствующего снижению тока инжектированных электронов, такое увеличение размеров области свечения, при неизменной площади сечения торца трубки, приводит к тому, что вектор скорости электронов, ускоренных в двойном слое между вспомогательным и основным разрядами, имеет большую вероятность хаотизироваться, еще до попадания электронов внутрь полости. Таким образом, угловой разброс электронов на входе полого катода увеличивается, что увеличивает длину

траектории их движения внутри полости, увеличивая там однородность генерации плазмы и, соответственно, уменьшает вероятность уноса на анод не израсходованной на ионизацию газа энергии инжектированных электронов. С ростом напряжения горения основного разряда также незначительно повышается коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии. Вторичные γ -электроны эмитируются из катода вдоль всей внутренней полости перпендикулярно ее оси. Это также может несколько повышать однородность распределения температуры поверхности полого катода.

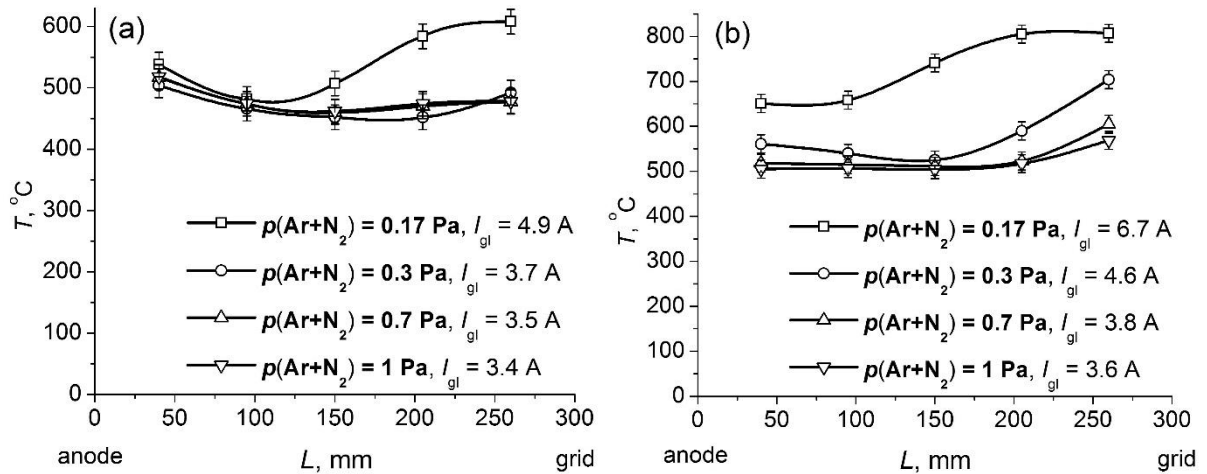


Рисунок 7. Зависимость распределения по длине полости L температуры T от давления $p(\text{Ar}+\text{N}_2)$ при токе вспомогательного разряда $I_{\text{PINK}} = 2$ А и напряжениях тлеющего разряда U_{gl} : а – 100 В, и б - 200 В.

Увеличение температуры стенок трубки вблизи анода, при напряжении тлеющего разряда 100 В (рис. 7 а), вероятно связано с разогревом анода и также наблюдается на графиках (рис. 6 а, б). Объяснение этому подробно изложено в описании к этому рисунку. Дальнейшее повышение давления до 1 Па не приводит к существенному изменению распределения температуры полого катода. При более высоком напряжении 200 В (рис. 7 б) прослеживаются аналогичные тенденции к изменению распределения температуры, с той разницей, что вблизи анода не наблюдается явного локального роста температуры. Локальное увеличение температуры в области сетки также наблюдается на графиках (рис. 6 а, б) при напряжениях 175 В и 250 В и связана с интенсивной ионизации газа в этой области, как это было подробно описано при анализе рисунка 6.

Необходимо отметить, что наличие сетки на торце трубки не может стабилизировать границу плазмы основного разряда, однако ее наличие и нахождение под потенциалом трубки (катода основного разряда) должно оказывать некоторое влияние на характер осцилляций ускоренных электронов как в области интенсивного свечения вне трубки, так и внутри трубки, в некоторой мере ограничивая свободный пролет электронов между этими

областями. Очевидно, что такое влияние будет зависеть не только от геометрической прозрачности используемой сетки, но и от ширины катодного слоя вокруг нее (а значит концентрации плазмы и напряжения горения основного разряда), однако влияние этих факторов на характер горения разряда в представленной системе не были подробно изучены в рамках представленной работы.

На графиках (рис. 8) представлены результаты распределения температуры стенок полого катода при разных токах и напряжениях горения основного разряда. Соответствующие токи вспомогательного разряда также приведены.

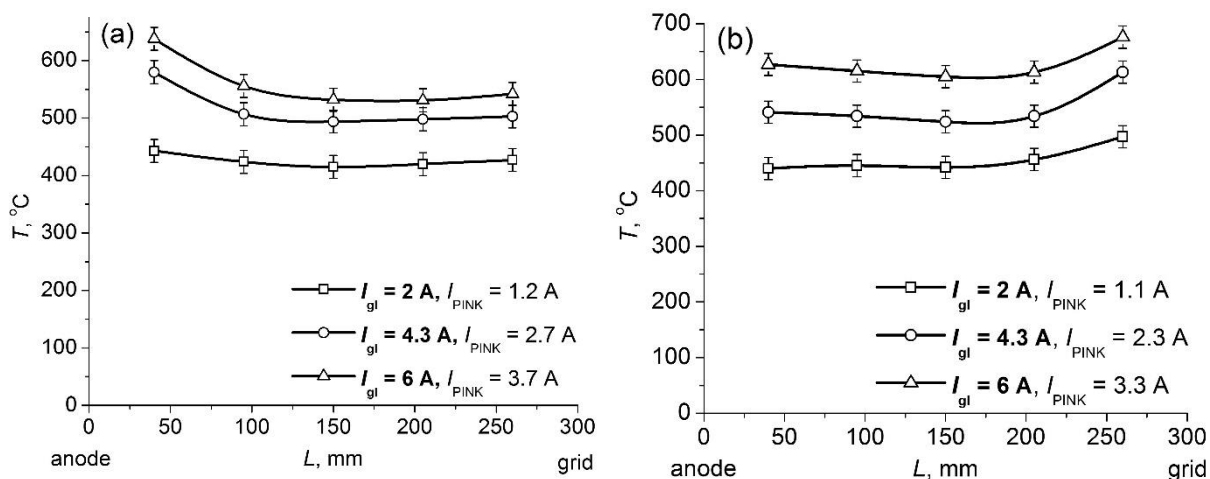


Рисунок 8. Зависимость распределения по длине полости L температуры T от тока тлеющего разряда I_{gl} при давлении $p(\text{Ar}+\text{N}_2) = 0.7$ Па и напряжениях тлеющего разряда: а - 100 В, и б - 200 В.

Видно, что абсолютные значения температуры стенок полого катода коррелируют с токами основного и вспомогательного разрядов и, соответственно, с мощностями в них, в то время как форма распределения температуры практически от них не зависит. Единственной особенностью можно считать существенное снижение температуры в области анода при напряжении горения основного разряда 100 В и снижении тока основного разряда до 2 А (рис. 8 а). Это снижение может объясняться тем, что при малом токе основного разряда и, соответственно, малой его мощности, температура конца вольфрамового анода снижается. При этом доля тепловой энергии, отводимая от него за счет его теплопроводности, повышается и оказывается существенной, в то время как доля тепловой энергии, отводимой за счет излучения - снижается. Так как тепловая энергия, отводимая за счет теплопроводности пропорциональна температуре, а отводимая за счет излучения – пропорциональна температуре в 4 степени, соответственно доля лучевой энергии, подогревающей стенки трубки в ее области приближенной к аноду, снижается быстрее, чем общая энергия в основном разряде. Общие же тенденции и факторы,

влияющие на распределение температуры стенок трубки остаются неизменными для данного рабочего давления и соответствуют приведенным и объясненным выше. Максимальная температура вблизи анода при напряжении горения основного разряда 100 В (рис. 8 а) связана с его разогревом. Максимальная температура вблизи сетки при напряжении горения основного разряда 200 В (рис. 8 б) связана с повышенной ионизацией вблизи соответствующего торца трубки.

3.3 Исследование зависимости распределения плотности ионного тока вдоль внутренней полости полого катода от основных параметров разрядной системы

На рис. 9 представлена схема измерений плотности ионного тока цилиндрическими коллекторами. В данной системе основной разряд зажигался внутри полости, которая являлась полым катодом с внутренним диаметром 25 мм и длиной 300 мм, а анодом являлся плоский водоохлаждаемый электрод, который располагался вблизи торца трубки. Замена вольфрамового анода на плоский водоохлаждаемый была обусловлена расплавлением и разрушением вольфрамового стержня вследствие неэффективного расхода энергии электронами на ионизацию и возбуждение рабочего газа, где подробно об этом было сказано в описании к рисунку 3.

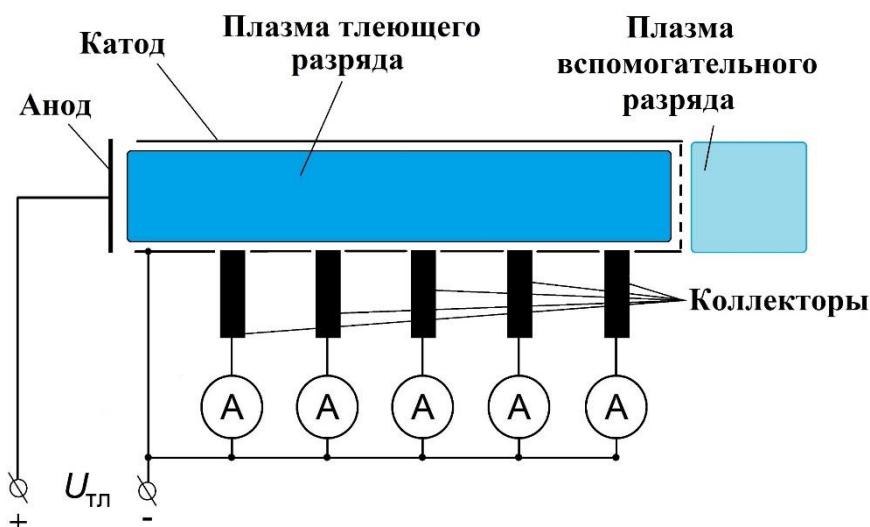


Рисунок 9. Схема измерения распределения плотности ионного тока вдоль внутренней полости полого катода.

Во время проведения экспериментов вдоль оси по пяти равноудалённым точкам производилось измерение плотности ионного тока с помощью цилиндрических коллекторов диаметром 3 мм. На коллекторы подавался потенциал катода, затем на каждом коллекторе измерялся ток с помощью амперметра.

На графиках (рис. 10 а) представлены результаты распределения плотности ионного тока по пяти точкам вдоль внутренней полости полого катода в зависимости от трёх

различных напряжений 100 В, 200 В и 250 В. Видно, что максимум плотности ионного тока находится в области инжекции электронов, где расположена вольфрамовая сетка. Этот максимум связан с тем, что при данном давлении область максимальной ионизации газа расположена вблизи торца трубки. При изменении напряжения от 100 В до 250 В увеличивается общее количество ионизаций что приводит к общему росту плотности ионного тока приблизительно пропорционально в каждой точке и не приводит к изменению локализации области с максимальной плотностью тока на катоде.

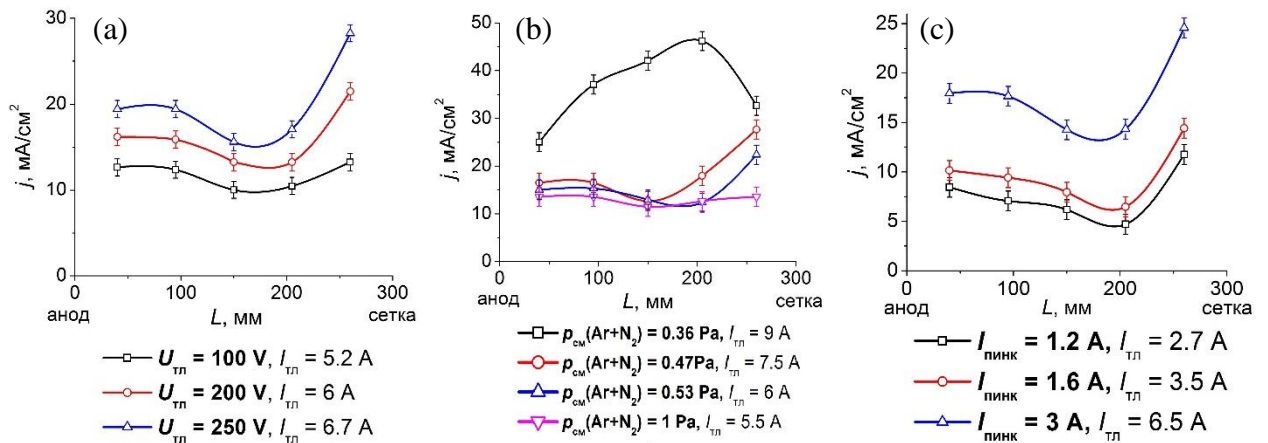


Рисунок 10. Результаты измерения распределения плотности ионного тока вдоль внутренней полости полого катода в зависимости от напряжения основного разряда (а) при $I_{\text{пунк}} = 3 \text{ A}$, $p_{\text{см}}(\text{Ar}+\text{N}_2) = 0.5 \text{ Па}$, давлении газовой смеси (b) при $I_{\text{пунк}} = 3 \text{ A}$, $U_{\text{тл}} = 200 \text{ В}$ и тока вспомогательного разряда (c) при $p_{\text{см}}(\text{Ar}, \text{N}_2) = 0.5 \text{ Па}$, $U_{\text{тл}} = 200 \text{ В}$.

На графиках (рис. 10 б) представлены зависимости распределения плотности ионного тока от различных давлений газовой смеси 0.36 Па, 0.47 Па, 0.53 Па и 1 Па. Видно, что уменьшение давления до 0.36 Па приводит к резкому росту средней плотности ионного тока. Такое поведение тока объясняется, тем что область максимальной ионизаций, создаваемая инжектированными электронами из плазмы вспомогательного разряда, проникает вглубь полости, вследствие увеличения длины свободного пробега электронов. В таком случае достигается максимальная неоднородность распределения плотности ионного тока вдоль внутренней поверхности полого катода на уровне $\pm 35\%$. При давлении 1 Па наблюдается минимальная неоднородность распределения плотности ионного тока, которая достигает значения $\pm 10\%$, так как при высоких давлениях ускоренные электроны из плазмы вспомогательного разряда имеют более высокую вероятность произвести первую ионизацию именно вне полости, вследствие чего их направление движения хаотизируется, что приводит к проведению следующей ионизации такими электронами равновероятно по всей длине полости. При условии относительно одинаковой температуры электронов и одинаковой зарядности ионов по длине полости характер распределения концентрации

плазмы согласно формуле Бома близок к характеру распределения плотности ионного тока по длине полости. В проведенном исследовании приняты эти допущения.

На графиках (рис. 10 с) представлены результаты измерения распределения плотности ионного тока в зависимости от трёх токов вспомогательного разряда 1.2 А, 1.6 А и 3 А, где наблюдается рост средней плотности ионного тока пропорционально увеличению вкладываемой мощности в разряд в каждой точке. Это говорит о том, что изменение тока инжектированных электронов в полость не приводит к изменению локализации области с максимальной ионизацией рабочего газа.

Глава 4. Проведение процесса ионно-плазменной химико-термической модификации внутренней поверхности

Следующим этапом исследований было проведение экспериментов для оценки однородности ионно-плазменного азотирования по длине полого электрода прямолинейной и изогнутой конфигурации. Исходя из исследований параметров и условий горения основного разряда был подобран режим горения разряда, при котором достигалась максимальная однородность распределения температуры вдоль обрабатываемых трубок. Эксперименты по азотированию проводились в течении 1 ч при одинаковом напряжении тлеющего разряда 200 В и давлении смеси рабочих газов в камере 1 Па ($N_2 = 10\%$, $Ar = 90\%$). Давление устанавливалось путём подачи N_2 в полый катод до давления 0.1 Па, далее добавлялся Ar через «PINK» до 1 Па. Ток тлеющего разряда устанавливался таким, чтобы средняя температура полости была (600 – 650) °С. В результате ток тлеющего разряда в прямолинейной полости составил 6 А, а в полости изогнутой формы 4 А, при одинаковой средней температуре, ток вспомогательного разряда составил 3.2 А и 2 А, соответственно. Такая разница токов свидетельствует о том, что при сложной форме полого катода, включающей его изгиб на 90° энергия электронов, инжектированных из вспомогательного разряда, расходуется на ионизацию газа внутри трубки более эффективно, чем при прямолинейной конфигурации. Исследования распределения толщины модифицированного слоя приведены на рис. 11, там же приведены распределения температуры, измеренные в процессе азотирования. Микротвердость полученного слоя слабо зависела от его глубины и составила ≈ 7.5 ГПа, при исходной твёрдости поверхности материала 2.6 ГПа.

Видно, что в прямолинейной полости средняя температура составила 625 °С при максимальном ее разбросе 55 °С, в полости изогнутой формы эти величины составили 630 °С и 35 °С, соответственно. Толщина азотированного слоя составила 57 мкм и 53 мкм, при максимальном разбросе 20 мкм и 9 мкм, соответственно. Более высокая однородность температуры и толщины модифицированного слоя в полости изогнутой формы может

объясняться тем, что электроны, извлечённые из плазмы вспомогательного разряда, производят больше осцилляций отражаясь от стенок полого катода в области его изгиба, производя больше ионизаций, тем самым повышая однородность генерации плазмы вдоль всей полости.

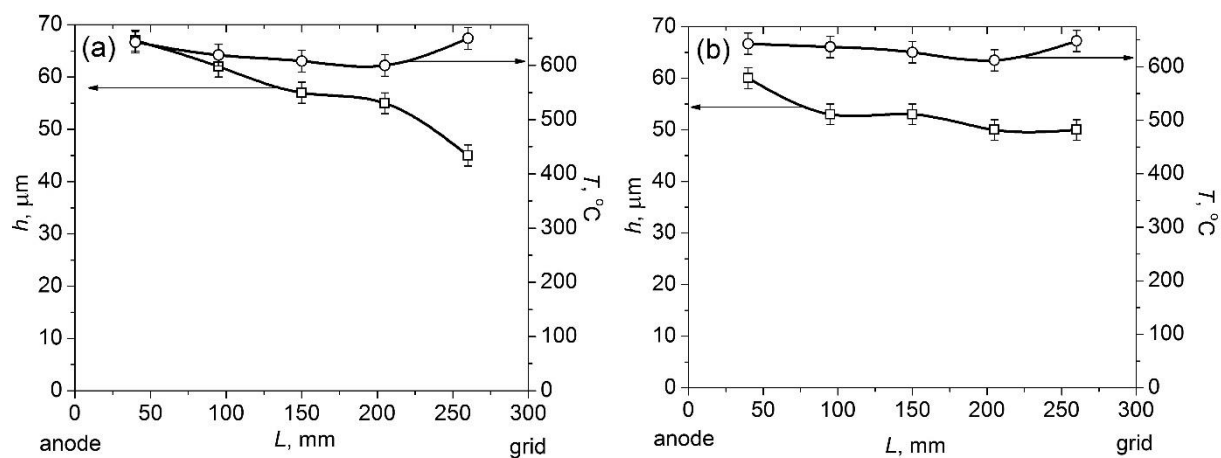


Рисунок 11. Зависимость распределения по длине полости L толщины азотированного слоя h и температуры T в прямолинейной (а) и в изогнутой (б) полостях.

В прямолинейной полости электроны, извлечённые из плазмы вспомогательного разряда, отдают меньше энергии на ионизацию рабочего газа, до ухода на анод, так как их движение внутри трубки, преимущественно, прямолинейное и направлено вдоль оси. Необходимо отметить общую тенденцию к росту толщины азотированного слоя по мере приближения к аноду, это вероятно, связано с понижением эффективности травления поверхности катода в этом направлении, что в свою очередь, может объясняться как градиентом парциального и общего давления азота в полости в направлении ее сеточного торца, так и обратным градиентом парциального давления аргона (увеличенными в случае прямолинейной полости). При этом парциальный состав рабочего газа определяет ионный состав плазмы, а сечение ионизации и коэффициент травления для ионов аргона выше, чем для ионов азота в 1.5 – 2 раза [24]. При этом, попадание ионов аргона на поверхность трубки не приводит к образованию нитрида, а увеличенное в районе анода рабочее давление увеличивает вероятность столкновения иона с молекулами газа и, соответственно, снижает среднюю энергию ионной бомбардировки поверхности. Следует отметить, что визуально внутренняя поверхность трубок выглядела сильно эродированной, очищенной до металла со стороны сетки, и гладкой, покрытой сероватым налетом в области анода.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Показано, что использование вспомогательного дугового разряда в электродной системе с цилиндрической протяжённой катодной полостью и помещённым в неё штыревым анодом, позволяет инициировать и поддерживать несамостоятельный тлеющий

разряд в широком диапазоне токов (2А – 10А), напряжений горения (100 В – 250 В) и рабочих давлений (0.1 Па – 1 Па), генерируя в катодной полости газоразрядную плазму обеспечивающую среднюю плотность ионного тока на катоде до 100 А/м². Можно применять такую плазму для эффективной ионно-плазменной обработки внутренней поверхности с целью улучшения их прочностных и, соответственно, эксплуатационных свойств.

2. Степень неоднородности концентрации плазмы до $\pm 35\%$ при давлениях (0.2-1) Па, генерируемой в несамостоятельном тлеющем разряде в металлическом трубчатом полем катоде прямой и изогнутой под 90° формы, имеющем длину на порядок большую её внутреннего диаметра, обусловлена инжекцией в него через сеточный электрод электронов из плазмы вспомогательного разряда и ускоренных в слое пространственного заряда до энергии, достаточной для относительно равномерной ионизации рабочего газа по всей длине полого катода, что позволяет разогревать стенки таких полостей с неоднородностью температуры не более $\pm 5\%$.

3. Ионно-плазменная обработка (азотирование) в плазме несамостоятельного тлеющего разряда внутренней поверхности длинной цилиндрической полости как прямой, так и изогнутой под 90° формы с длиной 300 мм и внутренним диаметром 25 мм осуществляется с неоднородностью толщины модифицированного слоя не более $\pm 10\%$ в азоте без использования водородосодержащих, взрывоопасных и токсичных газов таких как Н₂, NH₃, что расширяет технологические возможности такой обработки и позволяет повысить твёрдость поверхности стали 12Х18Н10Т с 2.6 ГПа до 7.5 ГПа.

Обоснование достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов в ходе экспериментальных исследований несамостоятельного тлеющего разряда подтверждается многократной воспроизводимостью на уровне не менее 90 %. Были использованы общепринятые и надёжные методы и средства измерения характеристик разрядной системы. Полученные результаты согласуются и не противоречат экспериментам, полученными ранее в подобных разрядных системах у других авторов.

Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений

Модификация внешней поверхности металлических изделий ионно-плазменными методами активно развивается и изучается в последнее время, однако до последнего момента ионно-плазменная обработка внутренних поверхностей полостей остается технологически сложно реализуема, в связи с фундаментальной проблемой генерации однородной плазмы в таких условиях.

Для решения задачи генерации плазмы в протяжённых цилиндрических полостях с длиной не менее 10 их внутренних диаметров была разработана двухразрядная система, где основной несамостоятельный тлеющий разряд генерировал плазму внутри длинной трубки, а вспомогательный разряд являлся источником дополнительных электронов, которые инжектировались вглубь полости через сетку, установленную на торце трубки. Это позволило инициировать и поддерживать несамостоятельный тлеющий разряд и осуществлять генерацию плазмы при напряжении горения основного разряда до 250 В, низком давлении до 1 Па и получить среднюю плотность ионного тока на катоде до 110 А/м².

Генерация плазмы тлеющим разрядом при низком давлении с внешней инжекцией электронов позволяет получать хорошую однородность распределения плотности ионного тока и, как следствие, хорошую однородность распределение температуры вдоль полого катода. Это позволяет проводить процессы ионно-плазменной обработки внутренней поверхности протяжённых полостей произвольной формы в отличие от известных разрядных систем, в которых генерация плазмы осуществляется в полостях только прямой конфигурации.

Впервые было показано использование плазмы несамостоятельного тлеющего разряда при низком давлении для ионно-плазменной модификации внутренней поверхности полостей не только прямой формы, но и произвольной формы (изогнутой на 90°). Однородность распределения температуры вдоль полости произвольной формы оказалась выше, чем в полости прямой формы, что указывает на более высокую однородность генерируемой плазмы несамостоятельным тлеющим разрядом. Также впервые было продемонстрировано, что генерация такой плазмы в произвольных полостях позволяет достигать хорошую однородность распределения температуры вдоль полости. Это даёт основание использовать данную плазму в процессах ионно-плазменной обработки, масштабировать и изменять конфигурацию разрядной системы, а также изучать параметры плазмы зондовыми и спектроскопическими методами для построения более полной физической модели основных процессов, происходящих в генерируемой плазме.

Сведения об опубликовании результатов исследования в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень журналов, рекомендованных ВАК РФ для опубликования материалов диссертационных работ

1. Игнатов Д.Ю., Денисов В.В., Лопатин И.В., Островерхов Е.В. Азотирование стали 30X16 в плазме несамостоятельных разрядов с полым и накаливаемым катодом. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т.59. – №7/2. – С. 76-80.

2. Лопатин И.В., Ковальский С.С., Игнатов Д.Ю. Тлеющий разряд с накаливаемым катодом и полым катодом большой площади для плазменного ассистирования при процессах дугового напыления покрытий // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т.59. – №9/3. – С. 261-264.

3. Лопатин И.В., Ахмадеев Ю.Х., Игнатов Д.Ю., Ковальский С.С., Крысина О.В., Петрикова Е.А. Система для ионно-пучковой обработки поверхности на основе самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 10/2. – С. 72-77.

4. Koval N.N., Ryabchikov A.I., Sivin D.O., Lopatin I.V., Krygina O.V., Akhmadeev Yu.H., Ignatov D.Y. Low-energy high-current plasma immersion implantation of nitrogen ions in plasma of non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes // Surface and Coatings Technology, 2018, Vol. 340, pp. 152-158, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.064.

5. Ignatov, D. Y., Lopatin, I. V., Denisov, V. V., Koval, N. N., & Ahmadeev, Y. H. (2020). Generation of Plasma in Non-Self-Sustained Glow Discharge With Hollow Cathode for Nitriding Inner Surfaces of Elongated and Complex Shaped Cavities. IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 48, no. 6, pp. 1–10, 2020, DOI:10.1109/tps.2020.2996739.

В сборниках трудов конференций

1. Lopatin I.V., Akhmadeev Yu.H., Ignatov D.Yu, Kovalskiy S.S., Petrikova E.A. System for deposition of diamond like a-C:H films in Ar-C₂H₂ plasma with ion beam assistance // 25th International Conference on Vacuum Technique and Technology, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 387, 012047, DOI:10.1088/1757-899X/387/1/012047.

2. Lopatin I. V., Akhmadeev Yu. H., Ignatov D. Yu., Petrikova E. A. and Proskurina E. A. Ion-beam chemical-thermal treatment of aluminum // IOP Conf. Series: Journal of Physics: 1115 (2018), 032044, DOI:10.1088/1742-6596/1115/3/032044.

3. Игнатов Д.Ю., Лопатин И.В., Денисов В.В., Крысина О.В., Ахмадеев Ю.Х., Коваль Н.Н. Генерация плазмы в самостоятельном тлеющем разряде с полым катодом для химико-термической обработки внутренней поверхности полостей протяжённой и сложной формы. // Труды VI Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника» – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 03-08 августа 2018 г., С. 65-69, DOI:10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-65-69.

4. Игнатов Д.Ю., И.В. Лопатин, В.В. Денисов, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль Ионно-плазменная модификация внутренней поверхности металлических изделий протяжённой и сложной формы с помощью плазмы самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, 2019, Т. 1, № 1-1. С. 131-133.

Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях

1. 24-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-24), 31 марта – 7 апреля 2018 г., Томск.
2. VI Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника», 3–8 августа 2018 г., Республика Бурятия, г. Улан-Удэ.
3. 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2018), 16 - 22 September 2018, Tomsk, Russia.
4. Международная научно-техническая конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2019», 22 – 24 мая 2019 г, г. Томск.
5. 14th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», 15–21 September 2019, Tomsk, Russia.

Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования

Подготовка экспериментальной установки для проведения исследований, разработка чертежей отдельных конструкций разрядной системы с целью их модернизации осуществлялись лично аспирантом. Проведение всех экспериментальных исследований проводилось лично автором работы. Обработка и интерпретация научных исследований осуществлялась совместно с сотрудниками лаборатории плазменной эмиссионной электроники и лаборатории пучково-плазменного инжиниринга поверхности ИСЭ СО РАН, в частности, Лопатин И.В осуществлял курирование выполняемых работ, принимал участие в обсуждении полученных экспериментальных результатов, осуществлял помощь в написании статей. Составление плана и постановка основных задач научно-исследовательской работы осуществлялось совместно с научным руководителем Ковалем Н.Н.

Список использованной литературы

1. Arzamasov B.N. Ionic chemical heat treatment of alloys: Monograph / B.N. Arzamasov, A.G. Bratukhin, Yu.S. Eliseev, T.A. Panayoti. - М.: Izd. MGTU im Bauman, 1999. - 400 p.
2. Berlin E.V. Plasma chemical-thermal surface treatment of steel parts: Monograph / E.V. Berlin, N.N. Koval, L.A. Seidman. - М: Technosphere, 2012. - 464 p.
3. Denisov V.V., Akhmadeev Yu.H., Lopatin I.V., Schanin P.M., Kovalsky S.S., Koval N.N., Yakovlev V.V. Pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode for nitriding of iron-based alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 81 (2015) p.012067 (1-6).

4. Akhmadeev Y.H., Denisov V.V., Koval N.N., Kovalsky S.S., Lopatin I.V., Schanin P.M., Yakovlev V.V. Generation of uniform low-temperature plasma in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode, *Plasma Physics Reports*. 2017. T. 43. № 1. C. 67-74.
5. Ivanov Yu.F., Laskovnev A.P., Denisov V.V., Uglov V.V., Petrikova E.A., Krysina O.V., Shymanski V.I., Cherenda N.N., Koval N.N. Nitriding of commercial pure titanium in the plasma of frequency-pulsed non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode at low pressure. // *High Temperature Materials Processes*. – 2017 – Vol. 21(1). – P. 13-23.
6. Ostroverkhov E.V., Denisov V.V., Denisova Yu. A., Koval N.N. and Lopatin I. V. Non-self-sustained low-pressure glow discharge for nitriding steels and alloys // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2018 – V.387. – p. 12056.
7. Kwon S.C., Park M. J., Baek W.S., Lee G. H. Geometric effect of ion nitriding on the nitride growth behavior in hollow tube, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1992, Volume 1, Issue 3, pp 353–358.
8. Goncharenko I.M., Oks E.M., Chagin A.A. Inner surface vacuum treatment method // Patent № RU 2039845 C1, 20.07.1995.
9. Liu B., Liu C.Z., Cheng D.J., Zhang G.L., R. He S.Z. Yang A new method for inner surface modification by plasma source ion implantation (PSII) *Nucl. Instrum. Methods B* 184 (2001) 644-648.
10. Wang J.L., Zhang G.L., Wang Y.N., Liu Y.F., & Yang S.Z. Grid-shadow effect in grid-enhanced plasma source ion implantation. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 192(1), 101–105.
11. Li Y., Zheng B.C., & Lei M.K. Engineering the tube size for an inner surface modification by plasma-based ion implantation. *Vacuum*, 2012, 86(9), 1278–1283.
12. Moskalev B.I. Discharge with a hollow cathode: M: Energy, 1969 - 184 p.
13. Pokorný Z., Kadlec J., Hrubý V., Joska Z., Tran D.Q., Beran D. Plasma nitriding of bored barrels, *Advances in Military Technology* 6 (2011) 69–75.
14. Borisyuk Y.V., Mozgrin D.V., Oreshnikova N.M., Berdnikova M.M., Pisarev A.A. Nitriding of internal cylindrical surfaces in abnormal glow discharge. // *Journal of Surface Investigation*, Volume 12, Issue 3, 1 May 2018, Pages 603-606.
15. Braceras I., Ibáñez I., Dominguez-Meister, S., Sánchez-García, J.A., Brizuela, M., Larrañaga, A., Garmendia, I., Plasma nitriding of the inner surface of stainless steel tubes, (2018) *Surface and Coatings Technology*, 355 , pp. 116-122.
16. Averin A. P. Gas discharge: course of lectures: 2 h. H. 1. Fundamentals of physics of atomic collisions. Vladimir. Gos.Un-t – Vladimir: publishing house of VSU, 2005. - 138 p.

17. Yu. P. Raizer, Gas Discharge Physics (Nauka, Moscow, 1987; Springer-Verlag, Berlin, 1991).
18. Korolev Yu.D Discharge formation processes and glow-to-arc transition in pseudospark switch / Yu.D. Korolev, K. Frank // IEEE Trans. Plasma Sci.. 1999. Vol. 27. No. Iss.5. pp. 1525-1538.
19. Korolev Yu.D High-Current Stages in a Low-Pressure Glow Discharge with Hollow Cathode / Yu.D. Korolev, O.B. Frants, N.V. Landl, I.A. Shemyakin, V.G. Geyman // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2013. – V.41. – №8. – P. 2087 – 2096.
20. Korolev Yu.D. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications / Yu. D. Korolev, N.N. Koval // J. Phys. D: Appl. Phys. –2018. – V.51. – p. 323001(1-21).
21. Borisov D.P., Koval N.N., and Schanin P.M. Generation of volumetric plasmas by a hot-cathode arc discharge. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika, no. 3, pp. 115–120, 1994.
22. Lopatin I.V., Akhmadeev Yu.H., Koval N.N., Effect of thermionic cathode heating current self-magnetic field on gaseous plasma generator characteristics, Rev. Sci. Instrum. 86 (10) (2015) 103301 (1-8).
23. Koval N.N., Ryabchikov A.I., Sivin D.O., Lopatin I.V., Krysin O.V., Akhmadeev Yu.H., Ignatov D.Yu. Low-energy high-current plasma immersion implantation of nitrogen ions in plasma of non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes, Surface & Coatings Technology, 2018, 340, p. 152–158.
24. Hoffman, Dorothy; Singh, Bawa; Thomas, John H. (1998). Handbook of Vacuum Science and Technology. Academic Press.
25. Lopatin I.V., Kovalskiy S.S., Koval N.N., Akhmadeev Y.H. A device and procedure for measurements of the effective secondary emission coefficient, Instruments and experimental techniques, 2015, Vol. 58, №2, p. 247-251.
26. Lieberman M.A. and Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Material Processing. John Wiley & Sons, 2005.
27. Marakhtanov M. K., Riazanov V. A. and Alekseev D. K. Modification of the electrode surface in glow discharge plasma with a hollow cathode, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1281 (2019) 012052.
28. Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Y.A., Panin V.V. Filling the vacuum chamber of a technological system with homogeneous plasma using a stationary glow discharge. Plasma Physics Reports. 2009. T. 35. № 12. C. 1058-1067.