

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 67 с., 25 рис., 13 табл., 19 источников.

Ключевые слова: газовый разряд, низкотемпературная плазма, тлеющий разряд, comsol simulation.

Объектом исследования является тлеющий разряд атмосферного давления в потоке газа.

Цель работы – исследование особенностей поддержания плазмы тлеющего разряда в потоке воздуха при атмосферном давлении.

В процессе исследования проводились: получение осциллограмм тока и напряжения горения разряда, фото-регистрация разряда, расчет параметров плазмы положительного столба разряда, компьютерное моделирование теплового и электрического полей области разряда.

В результате исследования определены параметры плазмы положительного столба разряда, выявлены особенности горения разряда.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: конструкция коаксиального плазматрона позволяет использовать низкотемпературную плазму на производственных линиях конвейерного типа.

Степень внедрения: частичная.

Область применения: фундаментальные исследования.

Экономическая значимость работы заключается в расширении областей применения низкотемпературной плазмы и рационализации плазменных технологий, используемых в различных областях науки и техники.

В будущем планируется продолжить изучение газоразрядной плазмы, используя результаты, представленные в этой работе.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	11
1.1 Описание тлеющего разряда	11
1.2 Практические применения тлеющего разряда	17
1.3 Актуальность изучения тлеющего разряда в потоке газа	20
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	21
2.1 Описание лабораторного стенда	21
2.2 Методика проведения экспериментов	24
2.3 Оценочный расчет параметров плазмы положительного столба	30
3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	39
3.1 Моделирование температурного поля положительного столба разряда и плазменной струи на его основе	39
3.2 Моделирование электрического поля плазматрона	43
3.3 Сопоставление результатов моделирования п. 3.1 и 3.2	45
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	48
4.1 Инициализация научно-технического исследования	48
4.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию	51
4.3 Бюджет научно-технического исследования	55
4.4 Оценка ресурсной и организационной эффективности исследования	58
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	60
5.1 Производственная безопасность	59
5.2 Экологическая безопасность	65
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	67
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	71

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время постоянно растет интерес к применениям плазменных технологий в производственных процессах. Обработка плазмой позволяет получать уникальные свойства изделий. Например, азотирование металлических изделий с использованием плазмы дугового разряда, позволяет значительно продлить срок службы изделий, при этом длительность плазменной обработки существенно меньше, чем при использовании других, например, механических методов [1].

Существуют различные виды разрядов, которые наиболее широко применяются в технологических процессах. Наибольшее распространение среди стационарных типов разрядов получил дуговой, для которого характерно низкое напряжения горения, в сравнении с тлеющим разрядом, и высокая температура разрядного канала. Впервые дуговой разряд был описан в 1802 году русским учёным В. Петровым в книге «Известие о гальвани-вольтовых опытах посредством огромной батареи, состоявшей из 4200 медных и цинковых кружков» [2]. С момента открытия данного типа разряда были проведены многочисленные исследования его свойств и особенностей, что на сегодняшний момент позволяет применять его в различных отраслях науки и техники.

Не меньший интерес представляет тлеющий разряд атмосферного давления. Хотя изначально тлеющий тип разряда был впервые обнаружен при пониженном давлении, горение его в атмосферном давлении расширяет возможности практического применения. Первым ученым, занявшимся детальным изучением газового разряда, был Майкл Фарадей. В период 1831-1835 годов Фарадей открыл при низких давлениях так называемый тлеющий разряд и установил его слоистую структуру. Для объяснения явления электролиза Фарадей в 1834 году вводит понятие «атома электричества». В 1837-1838 годах он подробно исследовал различные виды разрядов в газах, изучал разряд при пониженном давлении [3].

В течение долгого времени ученые во всем мире исследовали тлеющий разряд низкого давления, изучая его свойства, а также особенности горения. Значительный вклад в физику газового разряда внес Таунсенд, введя три коэффициента, характеризующие ионизационные процессы в газе [4].

В 1980 г. на основе группы газовой электроники под руководством Ю. Д. Королева была создана лаборатория с целью развития работ по импульсным объемным разрядам в газах высокого давления, исследованиям импульсных разрядов в газах, и разработка на этой основе устройств сильноточной электроники. Значительное место в тематике Института занимают работы по исследованию низкотемпературной плазмы газовых разрядов. Результаты цикла исследований воздействия внешнего ионизирующего излучения на процесс развития импульсного разряда высокого давления были зарегистрированы как научное открытие.

Сегодня тематика, связанная с газоразрядной плазмой, успешно развивается по многим направлениям. Заведующий лабораторией низкотемпературной плазмы, профессор Ю. Д. Королев выступает координатором программы «Физика низкотемпературной плазмы» Сибирского отделения РАН.

В 2006 году группой Ю. Д. Королева обнаружена и исследована особая форма нестационарного разряда атмосферного давления в вихревом потоке газа, и создан нестационарный слаботочный плазматрон на основе таких разрядов.

В настоящее время тлеющий разряд находит широкое применение в различных областях науки и техники. Плазматроны на основе тлеющего разряда, в отличие от дуговых, позволяют получать низкотемпературную плазму, а это открывает новые возможности. Например, низкотемпературная плазма позволяет напрямую воздействовать на полимеры и живые ткани. В работах [5] отмечено, что за счет содержания химически активных частиц в плазменной струе происходит эффективное обеззараживание экспериментальных образцов. Плазменные реакторы на основе слаботочного плазматрона позволяют осуществлять химический синтез в проточном режиме, т.е. когда реагенты (в

газовой или паро-газоовой фазе) подаются непрерывно в зону реакции. Применение плазмы тлеющего разряда в системе поддержания горения позволяет регулировать стехиометрические соотношения горючее/окислитель и получить тепловую мощность при сгорании углеводородов на порядок превышающую затрачиваемую электрическую мощность независимо от внешних факторов [6] .

Для того, чтобы иметь представление о процессах, происходящих при взаимодействии газоразрядной плазмы и плазменной струи с веществом, необходимо знать не только состав плазмы, образующейся при горении тлеющего разряда в потоке газа, но и происходящие в ней плазмохимические реакции.

В данной работе представлены результаты практического и теоретического исследования контрагированного плазменного столба тлеющего разряда в потоке воздуха при атмосферном давлении, а также плазменной струи на его основе.

В рамках экспериментально-практической части работы определены геометрические размеры плазменного столба и области отрицательного свечения тлеющего разряда в потоке воздуха при атмосферном давлении. Установлена зависимость геометрии различных областей тлеющего разряда при вариации разрядного тока в широких пределах.

Теоретическая часть работы базируется на анализе данных, полученных в результате интерпретации осциллограмм тока и напряжения горения разряда совместно с высокоскоростной фотографией. С использованием полученных результатов оценены концентрации заряженных частиц в плазме.

С использованием компьютерного моделирования в пакете программ COMSOL Multiphysics определены картины электрического поля в нестационарном плазматроне. Эти данные позволили определить в плазматроне области, в которых наиболее вероятно протекание электрических токов и формирование искрового пробоя.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Описание тлеющего разряда

Газовый разряд - это совокупность сложных физических явлений, представляющих собой электрический пробой газа, сопровождающийся формированием в нем проводящего канала и прохождением через него электрического тока. В значительной степени интерес к изучению разрядов обусловлен созданием в них плазмы. Возможности практического применения плазмы чрезвычайно многообразны: создание жизненно важных для человечества источников энергии с помощью управляемого термоядерного синтеза, разработка методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, использование плазмы в качестве активной среды лазеров, в плазмохимии, плазменных технологиях и др.. Газовые разряды в настоящее время являются основным средством создания плазмы с заданными физическими свойствами. Наиболее удобно изучать основные закономерности образования газоразрядной плазмы на примере тлеющего и дугового разрядов, не реже других находящих практические применения [7].

На примере классического случая тлеющего разряда низкого давления, рассмотрим характерные особенности его областей, а также определим его место среди других разрядов, используя ВАХ, представленную на рисунке 1.

Вах получена в неоне с холодными плоскими электродами из меди при давлении газа $p = 1$ Тор. При малых разрядных токах (менее 10^{-5} А) существует таунсендовский разряд, характерные черты которого: малая плотность тока, линейное изменение потенциала вдоль трубки и отсутствие заметного свечения. Стационарное состояние проводимости в разрядном промежутке поддерживается, если каждый вышедший из катода электрон, двигаясь к аноду, производит столько актов ионизации и возбуждения атомов, что под действием образованных им ионов и фотонов из катода выходит один электрон [7 - 9].

Условие стационарности имеет вид:

$$\gamma(e^{\int_0^d \alpha dx} - 1) > 1, \quad (1)$$

где α - первый коэффициент Таунсенда (коэффициент объемной ионизации), характеризующий число актов ионизации, производимых электроном на пути в 1 см в направлении действия поля; γ - третий коэффициент Таунсенда (коэффициент поверхностной ионизации), равный отношению числа эмиттированных электронов к числу приходящих на катод ионов; d – расстояние между катодом и анодом.

Коэффициент α зависит от рода газа и приведенной напряженности поля E/p , а коэффициент γ - от материала электрода, рода газа и энергии, с которой ион приходит на катод.

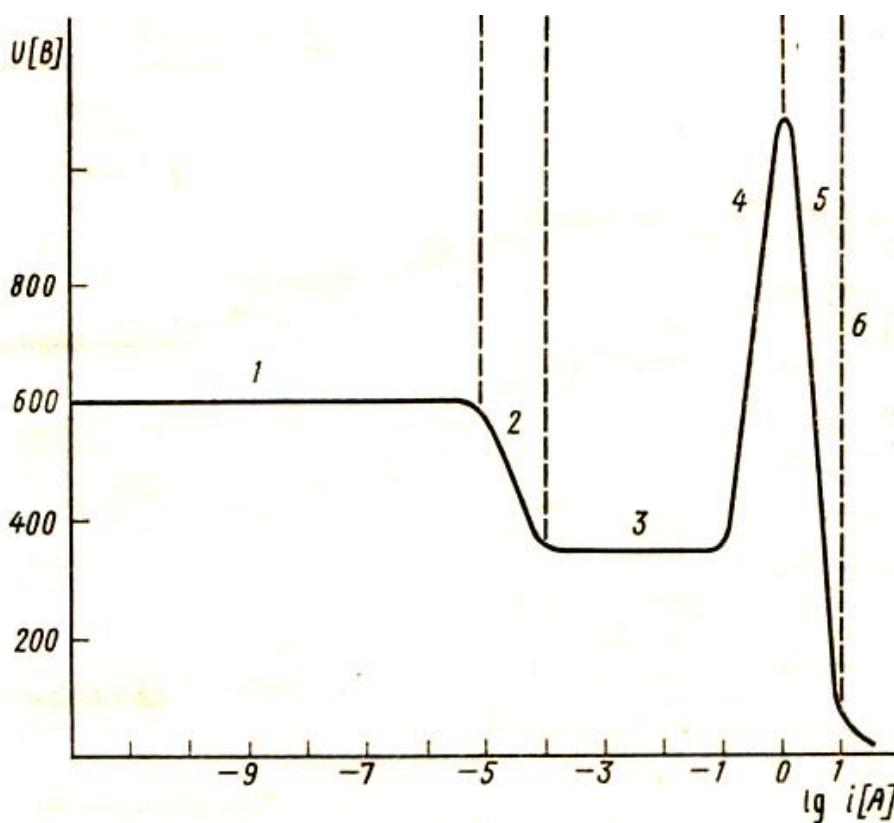


Рисунок 1. Вольт-амперная характеристика различных видов разряда в неоне с медными электродами ($p = 1$ торр, длина разрядной трубки 50 см).

1 - Таунсеновский разряд, 2 – переход от Таунсендовского к тлеющему разряду, 3 – тлеющий разряд, 4-5 – переход от тлеющего разряда к дуговому, 6 – дуговой разряд.

Падающий участок вольтамперной характеристики в интервале токов (10^{-5} - 10^{-4}) А соответствует переходу от таунсендовского разряда к тлеющему. В эксперименте разряд скачком переходит от таунсендовского к тлеющему, так как в пределах падающего участка ВАХ отсутствует устойчивое состояние разряда. При больших токах реализуется тлеющий разряд в нормальном режиме, вольтамперная характеристика которого почти параллельна оси абсцисс. Тлеющему разряду присущи отличительные особенности: характерное пространственное распределение интенсивности светящихся и темных областей, потенциала вдоль разрядной трубки, прочих характеристик разряда. Это объясняется тем, что, в отличие от таунсендовского, в тлеющем разряде его пространственная структура определяется присутствием значительного объемного заряда в разрядном промежутке. Вместе с тем, основные процессы, обеспечивающие существование тлеющего разряда, аналогичны лавинным процессам в таунсендовском разряде и происходят в катодных частях, где сосредоточено практически всё падение потенциала в разряде, называемое катодным падением. Поэтому условие стационарности тлеющего разряда также можно описать соотношением (1), где в качестве d надо брать длину d_k катодной области, заканчивающейся в начале области отрицательного свечения [7, 10] .

Важно отметить, что в различных пространственных областях тлеющего разряда создается плазма с сильно различающимися физическими свойствами (плазма положительного столба, плазма отрицательного свечения), подробнее рассмотренными ниже.

Основные свойства области катодного падения: большое падение потенциала, отсутствие квазинейтральности с подавляющим преобладанием положительного объёмного заряда и полное превосходство направленного движения заряженных частиц над хаотическим тепловым.

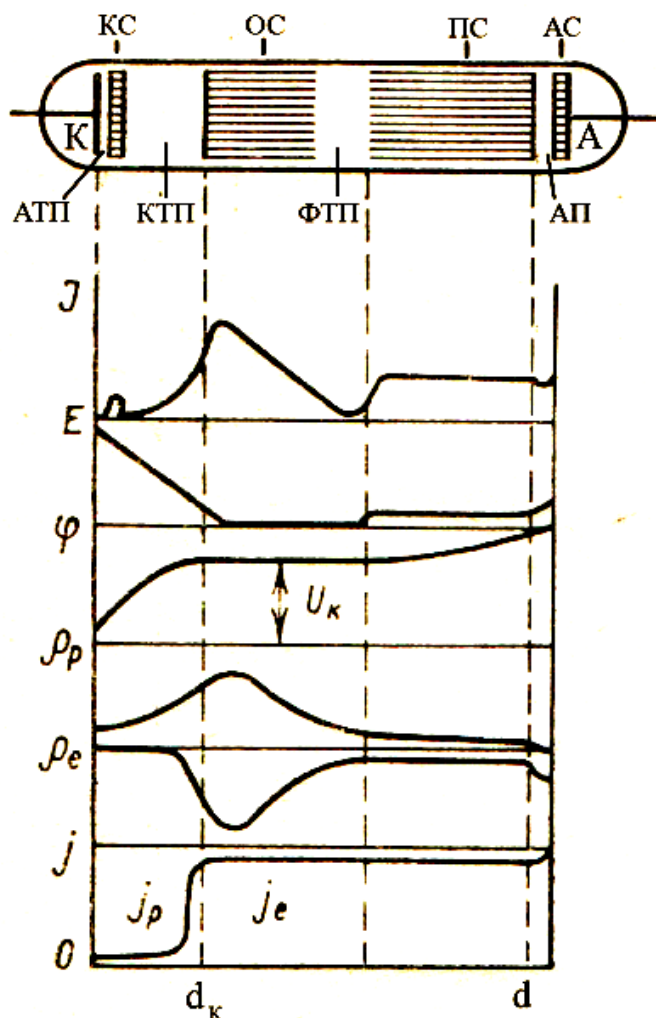


Рисунок 2 - Структура тлеющего разряда и распределения интенсивности свечения I , напряженности поля E , потенциала φ , плотностей зарядов и токов положительных ионов и электронов ρ_p, ρ_e, j_p, j_e , КС - катодное свечение, ОС - отрицательное свечение, ПС - положительный столб, АС - анодное свечение, АТП - астоново темное пространство, КТП - катодное темное пространство, ФТП - фарадеево темное пространство, АП - область анодного падения.

Как видно из рисунка 2, катодная область включает в себя три области: астоново темное пространство, катодное свечение и катодное темное пространство. В астоновом пространстве практически отсутствует свечение, так как эмиттировавшие с катода электроны в этой области не успевают набрать энергию, достаточную для возбуждения атомов газа. В области катодного свечения электроны приобретают энергию порядка $W_{k \max}$, соответствующую

максимальному значению функции возбуждения для низших энергетических уровней атомов рабочего газа. Продвигаясь в сторону анода, электроны продолжают набирать энергию в области катодного падения, и, в связи с уменьшением сечения возбуждения при $W > W_{k \max}$, вероятность возбуждения атомов падает, вследствие чего образуется темное катодное пространство [10] .

Когда при движении от катода электроны набирают энергию $W \geq W_i$ (W_i - энергия ионизации атома), формируют электронный пучок и проходят соответствующий путь свободного пробега, начинается процесс ионизации атомов, сопровождаемый появлением значительного количества электронов с энергиями $W \sim W_{k \max}$. В этом участке пространства возникает область отрицательного свечения, пронизываемая пучком быстрых электронов из области катодного падения. Ионизованный газ в рассматриваемой области квазинейтрален, представляя собой плазму отрицательного свечения со специфическими свойствами, для которой электронный пучок представляет собой как бы внешний, основной источник ионизации. В плазме отрицательного свечения наблюдаются наиболее высокие плотности заряженных частиц n_e в разрядном промежутке. Это типично пучковая плазма (плазма, возникающая при ионизации нейтрального газа электронным пучком) с крайне низкими значениями энергии основной массы электронов $\varepsilon_e \sim 0.1 \dots 0.3$ эВ и градиента потенциала (практически, эквипотенциальная область). Здесь, наряду с направленным движением относительно малочисленных электронов пучка, преобладает хаотическое движение заряженных частиц. Отличительной особенностью этой плазмы является нелокальный характер механизма формирования электронного энергетического спектра $f_e(W)$, вследствие чего длина релаксации энергии соизмерима с протяженностью всей области отрицательного свечения. Излучение в области отрицательного свечения со стороны катода обусловлено преимущественно возбуждением атомов быстрыми электронами, а со стороны анода - рекомбинацией заряженных частиц. В сторону анода от границы отрицательного свечения напряженность поля

возрастает и интенсивность свечения в этом месте падает вследствие уменьшения вероятности рекомбинации. Вследствие крайне низкой эффективной температуры основной массы электронов, очень низок уровень шумов в плазме, что обеспечивает высокую чувствительность области отрицательного свечения к энергетическому воздействию извне и позволяет, в частности, использовать её в качестве индикатора присутствия даже слабых полей ВЧ – и СВЧ – диапазона, повышающих температуру электронов [10] .

Возникающее за отрицательным свечением фарадеево темное пространство является переходной областью от катодных частей к положительному столбу. Механизм поддержания баланса заряженных частиц в плазме положительного столба принципиально отличается от такового в плазме отрицательного свечения. Положительный столб существует практически автономно, не будучи связан с физическими процессами в катодной области разряда. Ионизация и возбуждение газа, в отличие от области отрицательного свечения, производится не пучковыми, а тепловыми, наиболее быстрыми электронами функции распределения $f_e(W)$. В связи с этим, средняя энергия электронов достаточно велика $\varepsilon_e \sim 3 \dots 5$ эВ. Необходимую энергию электроны приобретают, ускоряясь продольным градиентом потенциала в плазме положительного столба, самосогласованно устанавливающимся в разряде [10].

Положительный столб представляет собой плазму с высокой проводимостью, которая играет просто роль проводника, приближающего анод к той области разрядного промежутка, в которой заканчивается формирование электронной лавины. Поэтому при изменении длины разрядного промежутка происходит прежде всего простое сокращение или увеличение длины положительного столба, в то время как при фиксированном значении силы разрядного тока характеристики области катодного падения V_k и d_k не изменяются [11].

1.2 Практические применения тлеющего разряда

На практике известно использование тлеющего разряда атмосферного давления в потоках различных газов. Наиболее распространена конфигурация электродов в виде коаксиального плазматрона, представленная на рисунке 3. Не менее редко встречается конфигурация в виде двух параллельных электродов. Данные электродные системы имеют свои особенности.

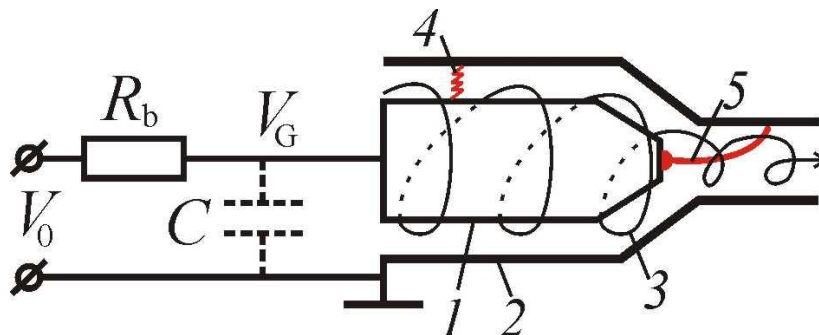


Рисунок 3. Схема коаксиального плазматрона. 1, 2 – электроды; 4 – искровая стадия разряда; 3 – траектория движения разряда под действием потока газа; 5 – положение разряда в заключительной стадии.

Одной из основных тенденций развития современной техники и технологии является все более широкое использование различных типов плазменных процессов, что в результате привело к возникновению и развитию, например, нового направления физической химии и химической технологии – плазмохимии, где осуществление химических реакций происходит в высокотемпературной среде плазмы или созданной плазмой.

В плазме, из-за появления высокореакционных частиц и излучения, возникают физико-химические взаимодействия, которые могут приводить к образованию новых соединений, не образующихся в обычном (низкотемпературном) состоянии (например, соединений из инертных газов). Более того, традиционные химические продукты, полученные в плазме, часто отличаются по своим свойствам от тех же продуктов, но полученных при обычных температурах. Таким образом, перевод веществ в состояние плазмы

увеличивает их реакционную способность. В частности, состояние плазмы может быть достаточно близким к состоянию термодинамического равновесия (квазиравновесие), а может быть далеким от него (неравновесная плазма). Поэтому плазмохимические системы иногда условно разделяют на два больших класса – неравновесные и квазиравновесные. Современные направления физики газового разряда тесно соприкасаются с проблемами взаимодействия плазмы разряда с веществом в целях модификации (изменения) свойств материалов, поверхностей и сред.

Под модификацией поверхности твердого тела подразумевают изменение химического состава и структуры поверхностного слоя. Плазмохимическая обработка позволяет получить материалы с уникальными свойствами поверхности, обусловленными одновременным воздействием излучения плазмы и химически активных частиц при относительно низкой температуре поверхности. Плазмохимической обработке могут подвергаться различные материалы: от металлов и их сплавов до различных полимеров как естественного, так и искусственного происхождения. В откачиваемую металлическую камеру помещают обрабатываемую деталь. В пространстве между поверхностями детали и стенки зажигается тлеющий разряд. Состав и давление плазмообразующего газа легко регулируется системой газоснабжения. Образующиеся в плазме заряженные частицы бомбардируют поверхность детали, в результате чего может изменяться химическая и кристаллическая структура поверхности и ее свойства (твердость, химическая и термическая стойкость и др.) [1].

При обработке плазмой органических материалов как искусственного, так и естественного происхождения (полимеров, пластмасс, тканей, бумаги и др.) изменяется состав и реакционная способность их поверхностей, что приводит к изменению их свойств. Так, при обработке полимеров может изменяться адгезия, смачиваемость, окрашиваемость, возможность склеивания как между собой, так и с другими материалами. Может резко уменьшиться

усадка обработанных волокон шерсти, измениться их электростатические характеристики и др. [12].

С помощью плазмы можно получать и снимать как неорганические, так и органические пленки, что широко используется в различных отраслях промышленности, науки и техники. Так, например, плазменные методы осаждения и травления пленок широко используются в микроэлектронике при изготовлении элементов тонкопленочных интегральных схем.

Плазмой обрабатываются не только твердые материалы, но и различные жидкости. При этом, в отличие от твердых тел, в жидкости могут возникать значительные потоки переноса массы (диффузия, конвекция), в результате чего возникшие при взаимодействии с плазмой физико-химические изменения в поверхностном слое жидкости могут распространиться по всему ее объему. Таким образом, за счет процессов перемешивания обработку объема жидкости можно проводить через обработку ее поверхности.

В качестве примера такого процесса можно отметить обработку плазмой воды с целью ее очистки и обеззараживания. Обеззараживание воды плазменной обработкой может служить альтернативой процессу хлорирования, поскольку при хлорировании воды образуются хлор-органические соединения, обладающие канцерогенными свойствами [13].

Под плазмохимической переработкой подразумеваются процессы, в которых все исходное вещество (а не только его поверхность) проходит стадию высокотемпературного состояния, обусловленного взаимодействием с плазмой, а химические реакции осуществляются, в основном, в газовой фазе. Из-за необходимости иметь высокую производительность в технологиях используется, как правило, квазиравновесная плазма высокого давления, которая получается в специальных устройствах – плазмотронах.

Широко используется в силовой электронике газонаполненные коммутаторы низкого давления – так называемые псевдоискровые разрядники [14].

1.3 Актуальность изучения тлеющего разряда в потоке газа

Тлеющий разряд атмосферного давления в потоке газа – относительно новое и малоизученное физическое явление. Существующие на сегодняшний день многочисленные его применения свидетельствуют о том, что происходит постепенное внедрение плазменных технологий в производство.

Несмотря на достигнутые успехи в области его практического применения, остается большой пласт неизученных процессов, происходящих в данном явлении. Существующие способы практического применения рассматриваемого типа разряда, являются поверхностными, поскольку в большинстве случаев механизм воздействия плазмы с веществом малоизучен. Изучение механизмов взаимодействия плазмы с различными типами материи – металлы, полимеры, живая ткань, должно быть обоснованным и опираться не на случайные идеи, а на результаты научных исследований и накопленного опыта. Двигателем научно-технического прогресса являются именно фундаментальные исследования, в том числе и касательно газоразрядной плазмы. Это позволит глубже понять природу электричества, вещества, и установить закономерности в поведении материи в различных термодинамических условиях.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Описание лабораторного стенда

Конфигурация электродов «лепестки» (рисунок 4), в отличие от коаксиального плазматрона (рисунок 3), позволяет визуально наблюдать столб разряда, что в свою очередь позволяет определять такие параметры разрядного канала, как площадь его поперечного сечения, длину, а также размер и форму катодного пятна.

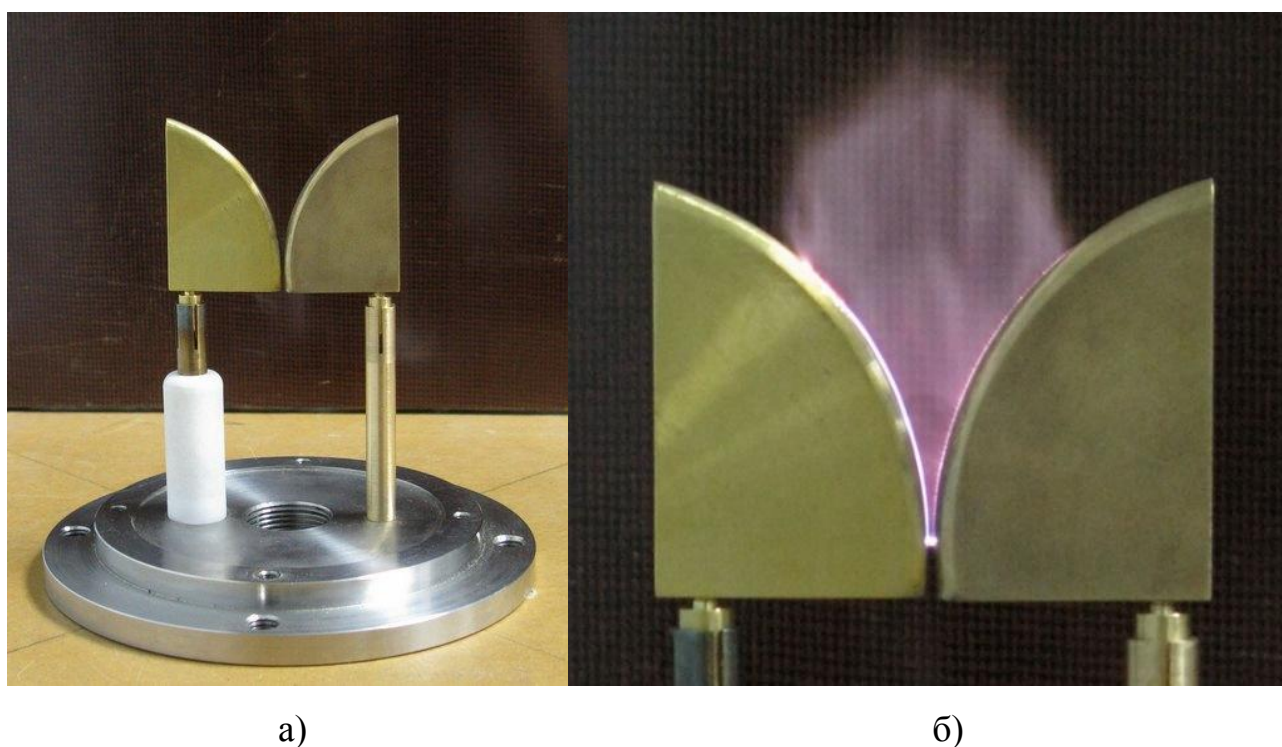


Рисунок 4. Конфигурация электродов «лепестки». а – общий вид, б – горение тлеющего разряда атмосферного давления в потоке газа.

Изучение особенностей горения разряда является ключевой задачей в изучении свойств, как плазмы положительного столба, так и плазменной струи на его основе.

Для изучения тлеющего разряда в потоке газа (в данной работе рабочим газом является воздух), используется специальный лабораторный стенд, функциональная схема которого представлена на рисунке 5.

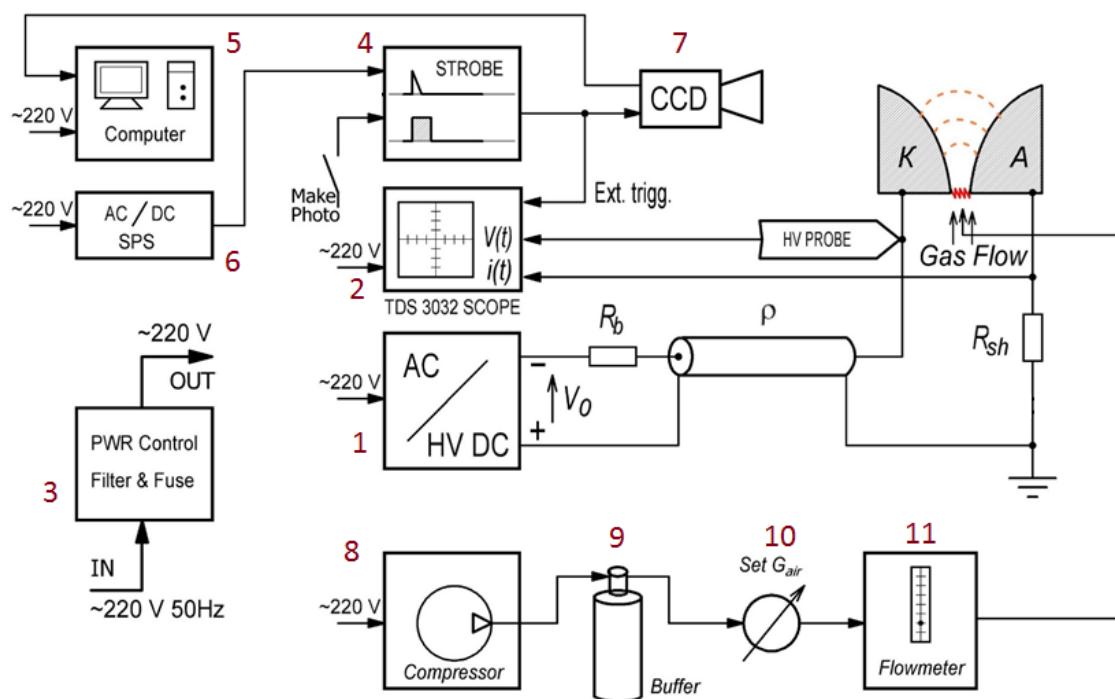


Рисунок 5. Функциональная схема лабораторной установки. 1 – высоковольтный источник постоянного напряжения; 2 – осциллограф; 3 – силовой блок; 4 – генератор запускающих импульсов; 5 – компьютер; 6 – источник постоянного напряжения для питания генератора 4; 7 – высокоскоростная камера; 8 – компрессор; 9 – газовый баллон; 10 – регулятор расхода газа; 11 – устройство для измерения расхода газа (ротаметр).

Напряжение от источника постоянного высокого напряжения (1) через балластное сопротивление R_0 , токовый шунт R_{sh} и коаксиальный кабель ρ подается на разрядный промежуток. Балластное сопротивление регулирует разрядный ток в цепи разряда, а также ограничивает его в случае короткого замыкания. В совокупности с автотрансформаторным регулятором выходного напряжения на источнике питания, ток разряда можно регулировать в широком диапазоне, от 5 мА до 0,5 А. В экспериментах использовались балластные сопротивления номиналом 124, 200, 300 кОм. Для снятия напряжения используется высоковольтный щуп с коэффициентом деления 1:1000, а ток фиксируется через низкоиндуктивный шунт сопротивлением 1 Ом.

Для регистрации тока и напряжения используется двухканальный осциллограф.

Источник питания позволяет получить на выходе постоянное напряжение до 5 кВ при мощности не более 2 кВт.

Генератор импульсов (4) подаёт запускающий сигнал на высокоскоростную камеру (7) и осциллограф (2) одновременно, что позволяет синхронизовать временную шкалу осциллографа и CCD-камеры. В результате, получаются несколько наложенных друг на друга фотографий с заданными длительностями экспозиций и интервалами между кадрами. Таким образом, получаем синхронизированные осциллограммы напряжения горения, тока разряда и фотографию с различными положениями столба разряда. Данная методика позволяет сопоставить параметры тока и напряжения разряда с его геометрическими размерами.

2.2 Методика проведения экспериментов

Условия эксперимента:

- Количество кадров: 4...8, в зависимости от рассматриваемой области и необходимой точности;
- Время экспозиции: 10 μs , выбирается исходя из условия $t_{\text{exp_min}} < \Delta t \ll \tau_{\text{disch}}$, где $t_{\text{exp_min}}$ – минимальное время выдержки, необходимое для набора достаточной экспозиции, $\tau_{\text{disch}} \approx 1\text{ms}$ – характерный временной масштаб изменения длины разрядного канала;
- Пауза между экспозициями: 390 μs , выбирается исходя из желаемой области рассмотрения;
- Постоянное напряжение на выходе источника питания: $V_0 = (0 \div 5) \text{ kV}$;
- Балластное сопротивление: $R_b = 124, 200, 300 \text{ k}\Omega$;
- Поток газа: $G(\text{air}) = 0.2 \text{ g/s}$;
- Расстояние между электродами: $d \sim 0.6 \text{ mm}$.

Исходные данные:

Фотография областей разряда, осциллограммы тока и напряжения.

1. Работа с фотографией

С помощью эталона длины определяется масштаб на снимке CCD камеры. Проверяется расхождение масштаба при нахождении объекта перед и за фокусом:

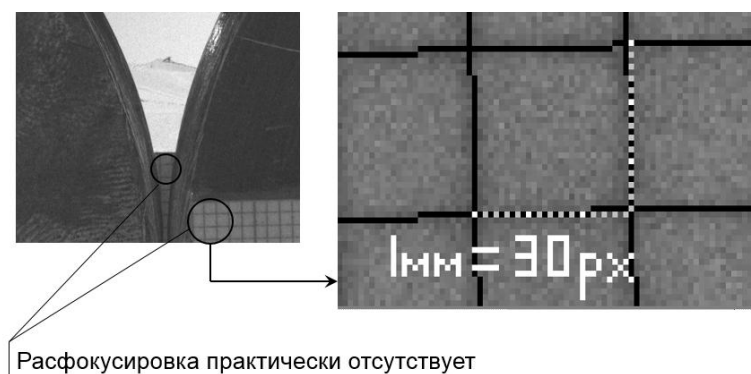


Рисунок 6. Проверка расхождения масштаба.

Зная масштаб на снимке камеры ($30 \text{ px} = 1 \text{ mm}$) выполняем:

а) Измерение диаметра катодного свечения D_{ng} в каждой экспозиции.

Диаметр катодного пятна уменьшаются по мере спада разрядного тока, что характерно для нормального тлеющего разряда. Зная диаметры катодных пятен, принимая их форму за круг вычисляем площадь катодного свечения S_{ng} используя соотношение: $S_{ng} = \frac{1}{4} \pi \cdot D_{ng}^2$.

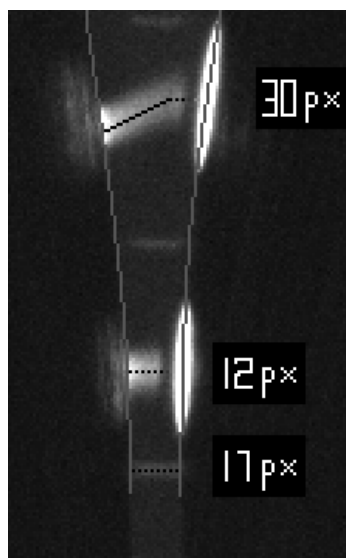


Рисунок 7. Определение диаметра катодного пятна и длины положительного столба.

б) Измерение диаметра D_{pc} и длины l_{pc} плазменного столба (ПС) в каждой экспозиции.

Длина канала определяется, в основном, длиной положительного столба. Его длина увеличивается, т.к. разрядный канал смещается под действием потока газа. Прирост длины почти постоянен во времени, dl_{pc}/dt составляет приблизительно 7 м/с.

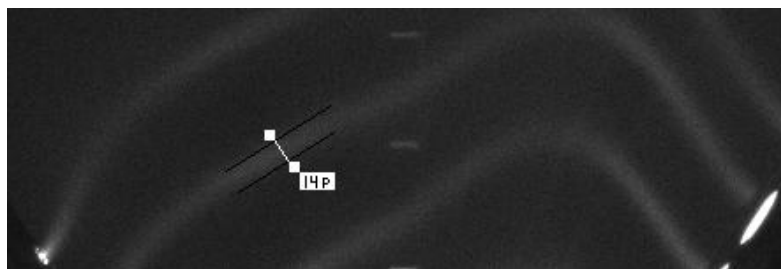


Рисунок 8. Определение диаметра положительного столба.

Диаметр разрядного канала по мере его движения увеличивается незначительно (на сотые доли мм), поскольку отклонения в пределах погрешности измерения - в расчётах принимаем $D_{pc} = const$.

Зная диаметр положительного столба, считаем, что канал имеет форму цилиндра. Тогда площадь его сечения - S_{pc} - вычисляем в соответствии с формулой: $S_{pc} = \frac{1}{4} \pi \cdot D_{pc}^2$.

в) *Оценку длины прикатодного слоя l_c :*

$l_c \sim 0.16 \text{ mm}$ и слабо меняется по мере движения разрядного канала.

Дальнейшие расчёты проводились для моментов времени после формирования устойчивого тлеющего разряда, когда $l_{pc} \gg l_c$, где l_{pc} – длина столба плазмы, а l_c – длина прикатодной области. Но при умеренной длине положительного столба, пока падение напряжения на столбе не начинает увеличиваться слишком быстро.

г) *Оценку скорости смещения центральной части ПС по вертикали v_z :*

За время между экспозициями столб разряда смещается вверх практически на одинаковое расстояние. Расчёт показал, что за $\Delta t = 2.8 \text{ ms}$ середина разрядного канала смещается на $\Delta z = 35 \text{ mm}$ по вертикали, что соответствует средней скорости $v_z = 14 \text{ m/s}$, и сходится с оценкой $v_{gas} = \frac{G}{\rho_{gas} S_{pipe}}$

для данных условий, где ρ_{gas} - плотность воздуха, S_{pipe} - площадь поперечного сечения трубки.

д) *Измерение межэлектродного промежутка d :*

По фото видно, что в самом узком месте межэлектродный зазор составляет $d = 0.6 \text{ mm}$. Для воздуха при нормальных условиях $E_{br} = 30 \text{ kV / cm}$, соответственно, напряжение первого пробоя можно оценить как : $U_{br} = E_{br} \cdot d \sim 1.8 \text{ kV}$. При дальнейших пробоях эта величина может быть несколько ниже из-за наличия «подсветки» промежутка, разогрева электродов и прочих факторов. В нормальном режиме новый пробой возникает приблизительно в том же месте, когда напряжение горения разряда приближается к пробивному, т.е. $V(t) \approx U_{br}$.

Поскольку $V_{pc} = V(t) - V_c$, а $V_c = const$ и величина удельного падения напряжения на единице длины положительного столба $E_{pc} = V_{pc}/l_{pc}$ слабо изменяется в процессе горения, новый пробой происходит, когда длин канала становится соизмерима с критической $l_{pc_critical} \approx \frac{E_{br} \cdot d - V_c}{\langle E_{pc} \rangle}$, что вовсе не связано с уменьшением энерговклада в разряд.

2. Работа с осциллограммой

Δt_1 - первая экспозиция.

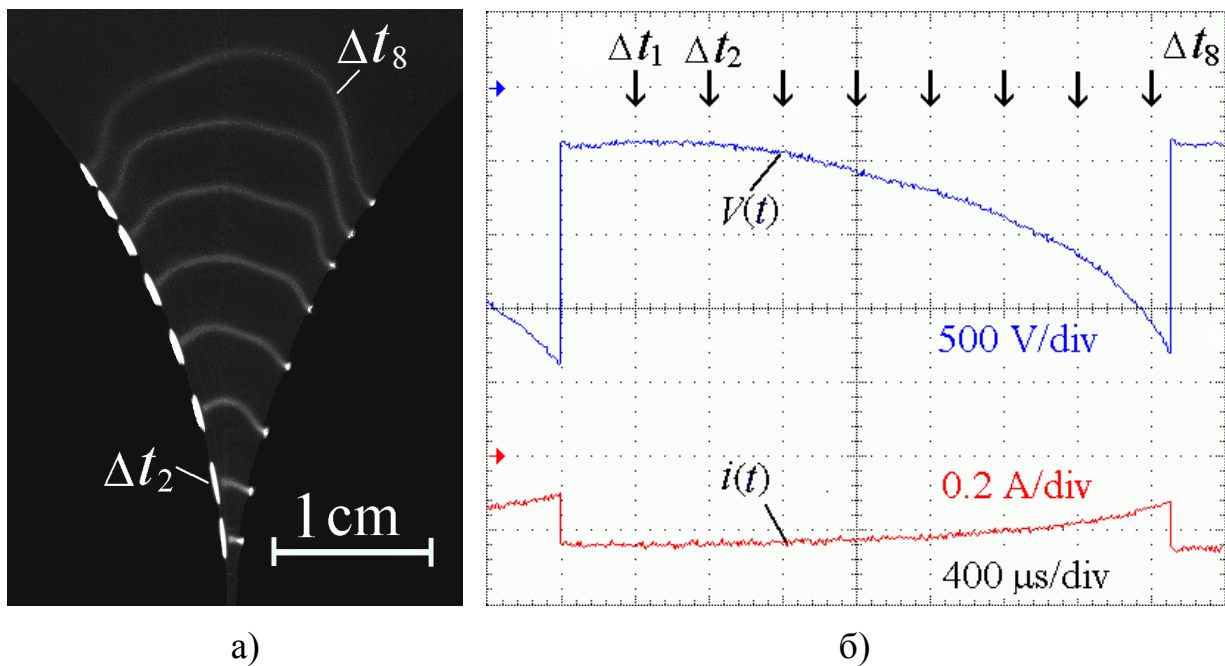


Рисунок 9. Горение разряда. а – положение столба разряда в различные моменты времени, б – осциллограмма тока и напряжения разряда.

Имея осциллограмму, выполняем:

а) Измерение напряжения горения $V(t)$ в промежутки времени $\Delta t_1 \dots \Delta t_n$;

б) Измерение тока разряда $i(t)$ в промежутки времени $\Delta t_1 \dots \Delta t_n$.

Поскольку $\Delta t \ll \tau_{disch}$ изменением измеряемой величины за время экспозиции можно пренебречь.

в) Проверку:

Для того, чтобы убедиться в достоверности полученных данных проверим выполнение закона Кирхгоффа для электрической цепи. Оцениваем

балластное сопротивление, как: $R_b = \frac{V_0 - V(t)}{i(t)}$, если измерения верны, с хорошей точностью выполняется $R_b = const$.

3. Промежуточные расчёты

а) *Оцениваем плотности электрического тока в различных областях разряда:*

Плотность тока в прикатодном слое: $j_{ng} = \frac{i(t)}{S_{ng}} = 4 \cdot i(t) / \pi \cdot D_{ng}^2$. Плотность тока в столбе тлеющего разряда: $j_{pc} = \frac{i(t)}{S_{pc}} = 4 \cdot i(t) / \pi \cdot D_{pc}^2$.

б) *Вычисляем падение напряжения на ПС разряда.*

Поскольку для нормального тлеющего разряда падение потенциала в прикатодной области практически постоянно, и в наших условиях составляет 250..350 В, принимая $V_c = 300V = const$, падение напряжения на положительном столбе разряда вычисляем в соответствии с выражением $V_{pc} = V(t) - V_c$.

в) *Оцениваем среднюю напряженность электрического поля E_{pc} в положительном столбе, в соответствии с формулой: $E_{pc} = \frac{V_{pc}}{l_{pc}}$.*

4. Оценка параметров разряда

а) *Имея полученные данные, можно оценить эффективное давление p_{eff_NG} и температуру газа T в прикатодной области.*

Поскольку для нормального тлеющего разряда величина $a = \frac{j}{p_{eff}} = const$, эффективное давление p_{eff_NG} можно оценить, как $p_{eff_NG} = \sqrt{\frac{j_{ng}}{a}}$, где значение параметра a для тлеющего разряда в воздухе нужно выбирать из диапазона $a = 240..300 \mu A/cm^2 \cdot torr^2$ [15].

Далее представляется возможным оценить температуру газа T в прикатодной области. Принимая $p_0 = 760 torr$ и $T_0 = 300K$, оценим температуру газа: $T = T_0 \frac{p_0}{p_{eff}}$. Реальное значение T_0 может быть несколько ниже из-за изменений комнатной температуры и эффекта «дросселирования» потока газа.

б) Модель для оценки плотности электронов $n_e(t)$ в положительном столбе разряда.

Будем считать, что для дрейфовой скорости электронов в положительном столбе разряда выполняется линейная аппроксимация $v_- = k \cdot \left(\frac{E}{p}\right)$. Для наших условий, принимаем $k = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$. Различные оценки показывают, что для поддержания столба плазмы нормального тлеющего разряда за счёт газовой ионизации характерно значение параметра E/p в диапазоне $\left(\frac{E}{p}\right) = 8..20 \frac{\text{V}}{\text{cm} \cdot \text{torr}}$ [15].

В этом случае имеем простейшую модель с $v_- = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = \text{const}$ и, зная зависимость $j_{pc}(t)$, можем оценить концентрацию электронов в столбе плазмы, используя соотношение $j = env$. В нашем случае считаем, что ток обусловлен, в основном, дрейфом электронов и запишем: $j_{pc}(t) \approx j_-(t) = ev \cdot n_e(t)$, откуда следует зависимость: $n_e(t) = \frac{j_{pc}(t)}{ev_-}$.

5. Расчёт электрических параметров разряда

а) Сопротивление разряда постоянному току можно рассчитать следующим образом:

$$R_g = \frac{V(t)}{i(t)}, \text{ а эквивалентное сопротивление столба плазмы } R_{pc} = \frac{V(t) - V_c}{i(t)}.$$

Тогда усреднённое удельное сопротивление плазмы на единицу длины столба

$$\rho_{pc} = \frac{R_{pc}}{l_{pc}}.$$

б) Проводимость плазмы – σ – параметр, удовлетворяющий соотношению

$$j = \sigma E, \text{ вычисляется, как: } \sigma = \frac{j_{pc}}{E_{pc}}.$$

в) Удельный энерговклад в положительный столб разряда – w , вычисляется по формуле: $w = j_{pc} \cdot E_{pc} [\text{Дж} / \text{с} \cdot \text{см}^3]$.

2.3 Оценочный расчет параметров плазмы положительного столба

Исходные данные при использовании блока балластных сопротивлений 124 кОм.

Ниже представлены осциллограммы тока и напряжения горения разряда и синхронизированная высокоскоростная фотография.

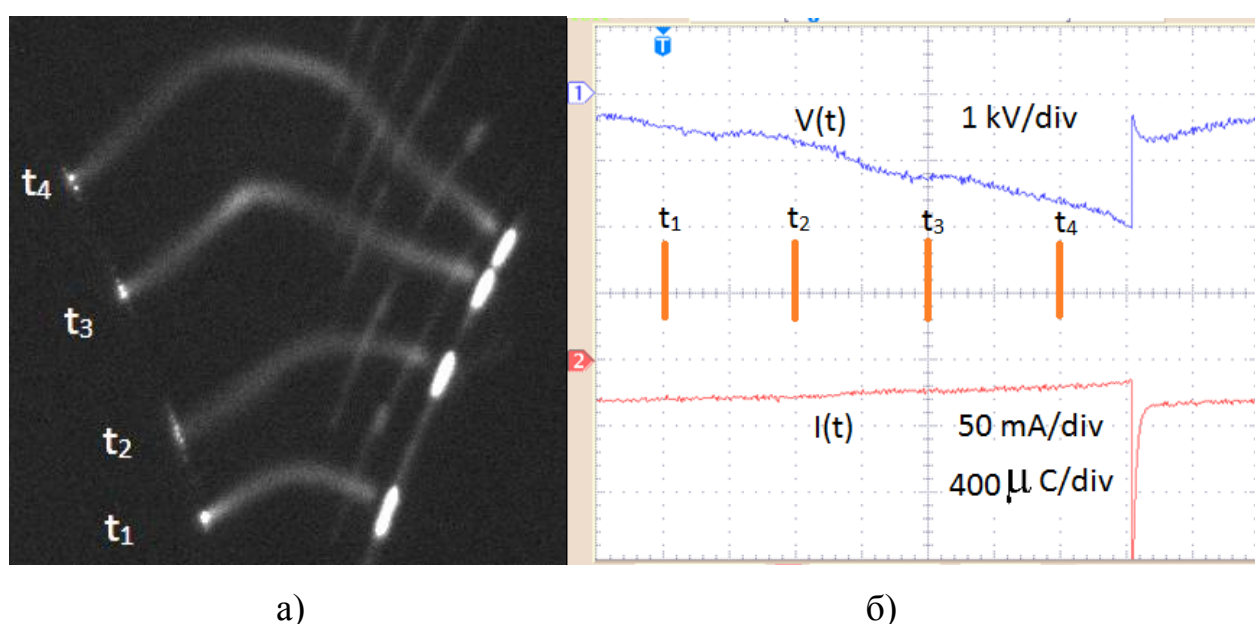


Рисунок 10. Горение разряда. а – высокоскоростная фотография, б – осциллограммы тока и напряжения горения разряда.

По представленной в п. 2.2 программе, произведён расчет параметров плазмы разряда. Экспериментальные данные, совместно с результатами оценочных расчётов сведены в таблице 1.

Фотография соответствует интервалу времени, в течение которого наблюдается изменение напряжения горения разряда от 500 В до 1,6 кВ, и тока в диапазоне от 30 до 21 мА. Длина положительного столба увеличена с 3,3 до 9.1 мм, при этом его диаметр оставался неизменным и составлял 0,32 мм. Диаметр катонного пятна уменьшился с 0.95 до 0.72 мм.

*Таблица 1. Расчетные данные совместно с результатами расчетов
для эксперимента с блоком сопротивлений 124 кОм.*

<i>Параметр</i>	<i>Обозначение, единица измерения</i>	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
<i>Момент времени на осциллограмме и фотографии</i>	t, mcs	0	800	1600	2400
<i>Напряжение горения разряда</i>	$V(t), \text{V}$	500	720	1240	1600
<i>Ток разряда</i>	$i(t), \text{mA}$	30	29	24	21
<i>Длина положительного столба</i>	l_{PC}, mm	3.3	4.9	6.6	9.1
<i>Диаметр положительного столба</i>	D_{PC}, mm	0.32	0.32	0.32	0.32
<i>Диаметр катодного пятна</i>	D_{NG}, mm	0.95	0.91	0.81	0.72
<i>Площадь катодного пятна</i>	$S_{NG}, 10^{-3} \text{cm}^2$	7.1	6.5	5.2	4.1
<i>Напряжение положительного столба</i>	V_{PC}, V	200	420	940	1300
<i>Напряженность положительного столба</i>	$E_{PC}, \text{V/cm}$	608	864	1420	1441
<i>Плотность тока катодного пятна</i>	$j_{NG}, \text{A/cm}^2$	4.2	4.5	4.7	5.2
<i>Плотность тока положительного столба</i>	$j_{PC}, \text{A/cm}^2$	37.3	36.1	29.8	26.1
<i>Эффективное давление положительного столба</i>	$p_{eff PC}, \text{torr}$	41	58	95	96
<i>Эффективное давление катодного пятна</i>	$p_{eff NG}, \text{torr}$	133	136	139	147
<i>Температура положительного столба</i>	T_{PC}, K	5620	3960	2410	2370
<i>Температура катодного пятна</i>	T_{NG}, K	1720	1670	1640	1560
<i>Концентрация электронов</i>	$n_e, 10^{13} \text{cm}^{-3}$	5.2	5.1	4.1	3.6
<i>Проводимость положительного столба</i>	$\sigma_{PC}, \text{S/cm}$	0.061	0.042	0.021	0.018

Исходные данные при использовании блока балластных сопротивлений 200 кОм.

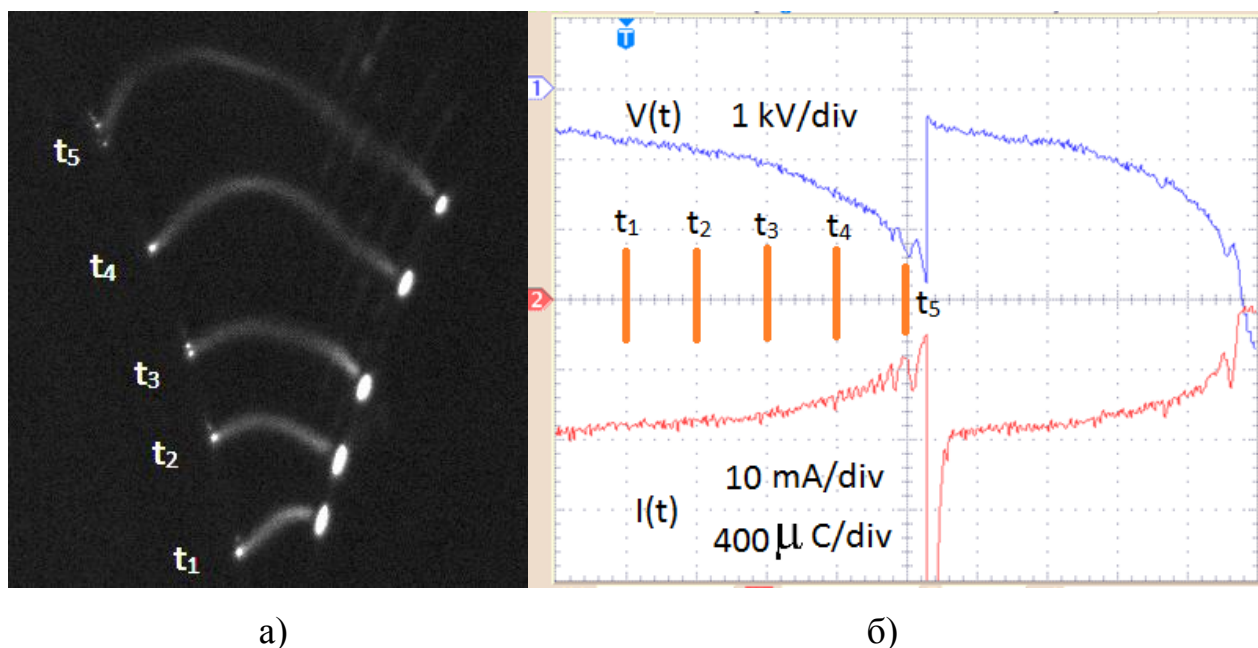


Рисунок 11. Рорение разряда. а – высокоскоростная фотография, б – осциллограммы тока и напряжения горения разряда.

Экспериментальные данные, совместно с результатами оценочных расчётов сведены в таблице 2.

Фотография соответствует интервалу времени, в течение которого наблюдается изменение напряжения горения разряда от 740 В до 2,4 кВ, и тока в диапазоне от 18,3 до 9 мА. Длина положительного столба разряда увеличена с 3,3 до 9.1 мм, при этом его диаметр оставался неизменным и составлял 0,25 мм. Диаметр катонного пятна уменьшился с 0.61 до 0.35 мм.

Экспозиция t_5 соответствует ситуации пониженного энерговклада в разрядный канал. Наблюдаются существенные изменения параметров разряда.

*Таблица 2. Расчетные данные совместно с результатами расчетов
для эксперимента с блоком сопротивлений 200 кОм.*

Параметр		Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5
Момент времени на осциллограмме и фотографии	t, mcs	0	400	800	1200	1600
Напряжение горения разряда	$V(t), \text{V}$	740	880	1060	1500	2400
Ток разряда	$i(t), \text{mA}$	18.3	17	16	14	9
Длина положительного столба	l_{PC}, mm	1.5	2.6	3.7	5.9	8.5
Диаметр положительного столба	D_{PC}, mm	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Диаметр катодного пятна	D_{NG}, mm	0.61	0.61	0.52	0.51	0.35
Площадь катодного пятна	$S_{\text{NG}}, 10^{-3} \text{cm}^2$	2.9	2.9	2.1	2.1	0.96
Напряжение положительного столба	V_{PC}, V	440	580	760	1200	2100
Напряженность положительного столба	$E_{\text{PC}}, \text{kV/cm}$	2.9	2.3	2.1	2.0	2.5
Плотность тока катодного пятна	$j_{\text{NG}}, \text{A/cm}^2$	5.9	5.5	7.1	6.4	8.3
Плотность тока положительного столба	$j_{\text{PC}}, \text{A/cm}^2$	35.2	32.6	30.6	26.5	16.3
Эффективное давление положительного столба	$p_{\text{eff PC}}, \text{torr}$	148	112	101	101	123
Эффективное давление катодного пятна	$p_{\text{eff NG}}, \text{torr}$	157	151	171	162	186
Температура положительного столба	T_{PC}, K	1530	2020	2240	2250	1840
Температура катодного пятна	T_{NG}, K	1450	1510	1330	1400	1230
Концентрация электронов	$n_e, 10^{13} \text{cm}^{-3}$	3.7	3.4	3.2	2.8	1.7
Проводимость положительного столба	$\sigma_{\text{PC}}, \text{S/cm}$	0.012	0.014	0.015	0.013	0.007

Исходные данные при использовании блока балластных сопротивлений 300 кОм.

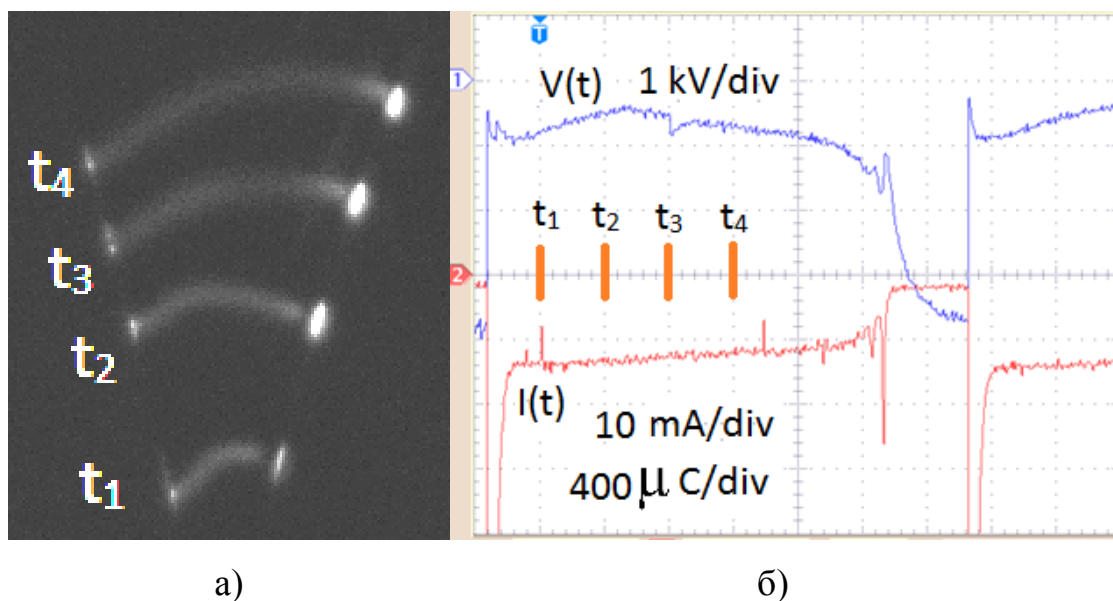


Рисунок 12. Горение разряда. а – высокоскоростная фотография, б – осциллограммы тока и напряжения горения разряда.

Фотография соответствует интервалу времени, в течение которого наблюдается изменение напряжения горения разряда от 500 до 860 В, и тока в диапазоне от 13 до 11,5 мА. Длина положительного столба разряда увеличена с 1,3 до 3,6 мм, при этом его диаметр оставался неизменным и составлял 0,2 мм. Диаметр катонного пятна уменьшился с 0,48 до 0,43 мм.

.Концентрация электронов в плазме разряда составляет $(5...6) \cdot 10^{13}/\text{см}^3$.

*Таблица 3. Расчетные данные совместно с результатами расчетов
для эксперимента с блоком сопротивлений 300 кОм.*

<i>Параметр</i>	<i>Обозначение, единица измерения</i>	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
<i>Момент времени на осциллограмме и фотографии</i>	$t, \text{ mcs}$	0	400	800	1200
<i>Напряжение горения разряда</i>	$V(t), \text{ V}$	500	560	680	860
<i>Ток разряда</i>	$i(t), \text{ mA}$	13	12,5	12,1	11,5
<i>Длина положительного столба</i>	$l_{PC}, \text{ mm}$	1,3	1,9	2,7	3,6
<i>Диаметр положительного столба</i>	$D_{PC}, \text{ mm}$	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Диаметр катодного пятна</i>	$D_{NG}, \text{ mm}$	0,48	0,49	0,53	0,43
<i>Площадь катодного пятна</i>	$S_{NG}, 10^{-3} \text{ cm}^2$	1.81	1.89	2.21	1.45
<i>Напряжения положительного столба</i>	$V_{PC}, \text{ V}$	200	260	380	560
<i>Напряженность положительного столба</i>	$E_{PC}, \text{ kV/cm}$	1,6	1,3	1,4	1,6
<i>Плотность тока катодного пятна</i>	$j_{NG}, \text{ A/cm}^2$	5,5	5,9	6,2	6,9
<i>Плотность тока положительного столба</i>	$j_{PC}, \text{ A/cm}^2$	41.4	39.8	38.5	36.6
<i>Эффективное давление положительного столба</i>	$p_{eff PC}, \text{ torr}$	107	88	94	105
<i>Эффективное давление катодного пятна</i>	$p_{eff NG}, \text{ torr}$	173	166	151	182
<i>Температура положительного столба</i>	$T_{PC}, \text{ K}$	2140	2600	2420	2170
<i>Температура катодного пятна</i>	$T_{NG}, \text{ K}$	1320	1370	1510	1260
<i>Концентрация электронов</i>	$n_e, 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	5.7	5.5	5.3	5.1
<i>Проводимость положительного столба</i>	$\sigma_{PC}, \text{ S/cm}$	0.026	0.030	0.027	0.023

Полученные экспериментальные данные позволили рассчитать параметры тлеющего разряда.

В ходе анализа полученных параметров были определены следующие особенности поддержания плазмы:

Плотность тока в прикатодном слое $j_{ng} = \frac{i(t)}{S_{ng}} = 4 \cdot i(t) / \pi \cdot D_{ng}^2$ увеличивается в процессе горения разряда, несмотря на спад разрядного тока, и за время эволюции разряда изменяется в диапазоне (4...7) А/м². Данное поведение наблюдается в широком диапазоне разрядных токов. С уменьшением разрядного тока, наблюдается увеличение среднего значения j_{ng} с 4,5 до 6 А/м².

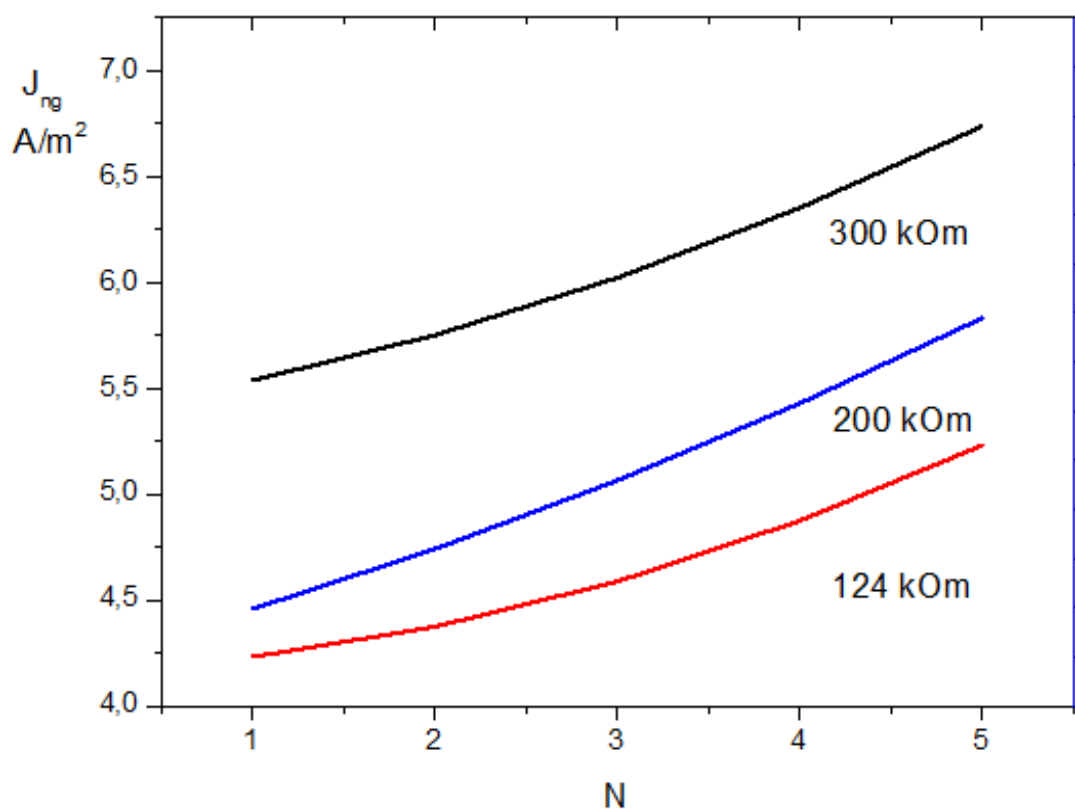


Рисунок 13. Динамика плотности тока в прикатодной области разряда.

Плотность тока в столбе разряда $j_{pc} = \frac{i(t)}{S_{pc}} = 4 \cdot i(t) / \pi \cdot D_{pc}^2$ спадает, повторяя временной ход зависимости $i(t)$, что объясняется практически неизменной

площадью поперечного сечения положительного столба разряда в процессе его движения.

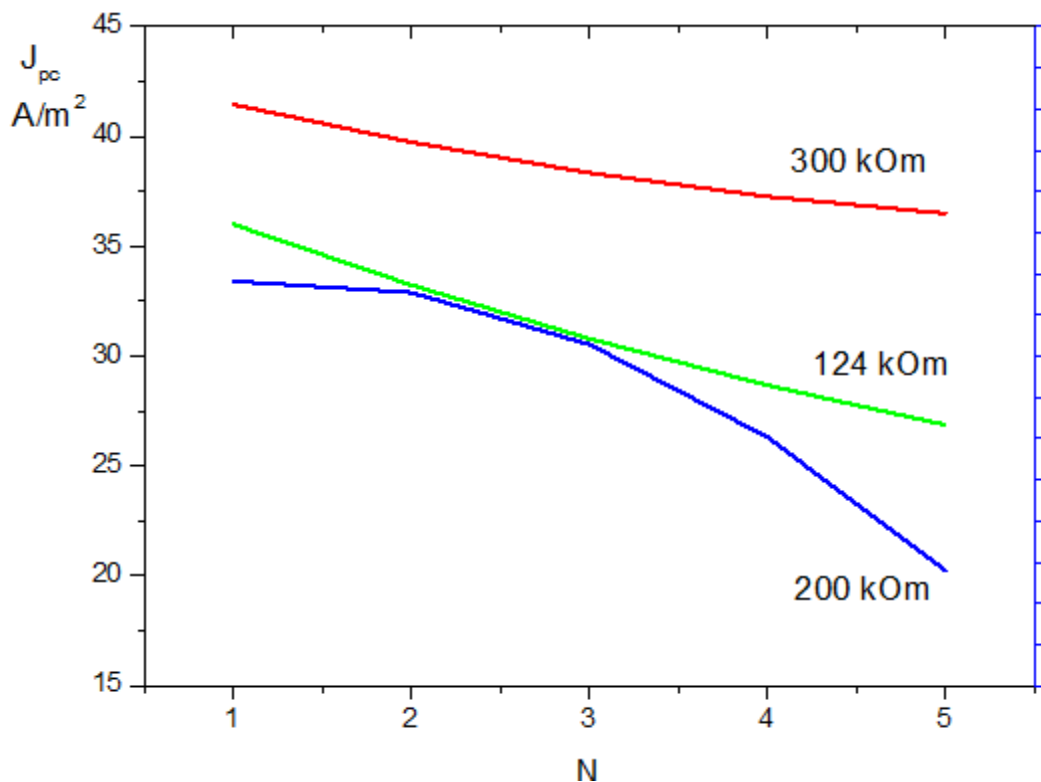


Рисунок 14. Зависимость плотности тока положительного столба в соответствии с номером экспозиции на фото

По мере развития разряда величина $E_{рс}$ - напряженность поля положительного столба, сначала резко падает от нескольких кВ/см до, приблизительно, 550 В/см, задерживаясь на этом уровне почти всё время горения; ближе к концу процесса удлинения положительного столба, напряжение горения возрастает быстрее, чем его длина, поэтому перед новым пробоем величина $E_{рс}$ может возрасти до 700..1100 В/см, в зависимости от условий эксперимента и формы канала.

Оценки концентрации электронов показывают, что в разрядной плазме для различных разрядных токов, n_e составляет $(2 \div 6) \cdot 10^{13} / \text{см}^3$. По мере увеличения длины разряда, наблюдается снижение n_e . В эксперименте с блоком

балластных сопротивлений 200 кОм на экспозиции t_5 – рисунок 10 а, зафиксирован разрядный канал за время порядка 100 мкс до момента перепробоя, что видно из осциллограммы, представленной на рисунке 10 б. Этот случай соответствует ситуации пониженного энерговклада в плазму разряда. При увеличении площади поверхности происходит спад разрядного тока, что приводит к существенному охлаждению канала разряда и спаду его проводимости. Концентрация электронов составляет $1,7 \cdot 10^{13}/\text{см}^3$. Наблюдается резкое уменьшение площади катодного пятна (с 2,1 до 0,9 мм² за 400 мкс – время между экспозициями) при неизменной площади положительного S_{pc} . Проводимость положительного столба за это же время также снижается почти в 2 раза – с 0,013 до 0,007 См/см, а его напряжение увеличивается с 1200 до 2100 В. В этом режиме отмечается повышение плотности тока прикатодной области с 6,4 до 8,3 А/м² и вместе с тем снижение плотности тока положительного столба с 26,5 до 16,3 А/м².

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1 Моделирование температурного поля положительного столба разряда и плазменной струи на его основе

Для изучения физических явлений, происходящих в газоразрядной плазме, не всегда бывает достаточно экспериментальных данных. Газовый разряд является сложным физическим явлением с той точки зрения, что представляет собой совокупность различных физических процессов, а именно – преобразование электрической энергии в тепловую и химическую энергию межатомных связей, в результате чего происходит излучение квантов света в широком диапазоне длин волн. Помимо этого, следует учитывать постоянное воздействие электрического поля, которое одновременно оказывает влияние на разряд, но в то же время разряд вносит изменение в картину электрического поля, при воздействии на него, например, потоком газа.

Известно, что влияние на условия горения газового разряда оказывают как напряженность электрического поля в разрядном промежутке, так и давление, при котором горит рассматриваемый разряд.

Учитывая сложность процессов, происходящих в газоразрядной плазме, было решено произвести компьютерное моделирование термодинамических и электростатических процессов независимо друг от друга, и объединить решения для определения картины E/p .

При изучении особенностей горения газового разряда, принято использовать значение так называемого эффективного давления:

$$p_{eff} = p_0 \frac{T_0}{T_{gas}}, \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды, T_{gas} – абсолютная температура газа в области плазмы, К; p_0 – атмосферное давление.

Данное уравнение устанавливает соотношение между температурой окружающей среды, температурой в области плазмы разряда и плотностью нейтральных частиц.

Измерение температуры газоразрядной плазмы является непростой задачей. Поэтому, в данном случае, целесообразно компьютерное моделирование.

Компьютерное моделирование произведено в программе COMSOL Multiphysics.

Важное значение в изучении особенностей поддержания плазмы в положительном столбе тлеющего разряда в потоке газа оказывает именно температурное поле, поскольку оно позволяет оценить не только значение эффективного давления, но и баланс мощностей в разряде.

Теплопередача от разряда в окружающую среду осуществляется следующими механизмами:

1. Тепловое излучение;
2. Конвекция;
3. Теплопроводность среды.

Компьютерная модель положительного столба тлеющего разряда представляет собой цилиндр с диаметром 0,3 мм и длиной 10 мм, что соответствует экспериментальным данным. Подводимая электрическая мощность составляет 20 Вт.

В результате моделирования были получены радиальные распределения температур положительного столба разряда. Зависимости получены для скорости потока газа 5 м/с и без потока.

Можно заметить, что при отсутствии потока, температура в центре разряда достигает 5500 К. При увеличении потока, температура в центре столба спадает незначительно, а тепловое поле смещается в противоположную направлению потока сторону.

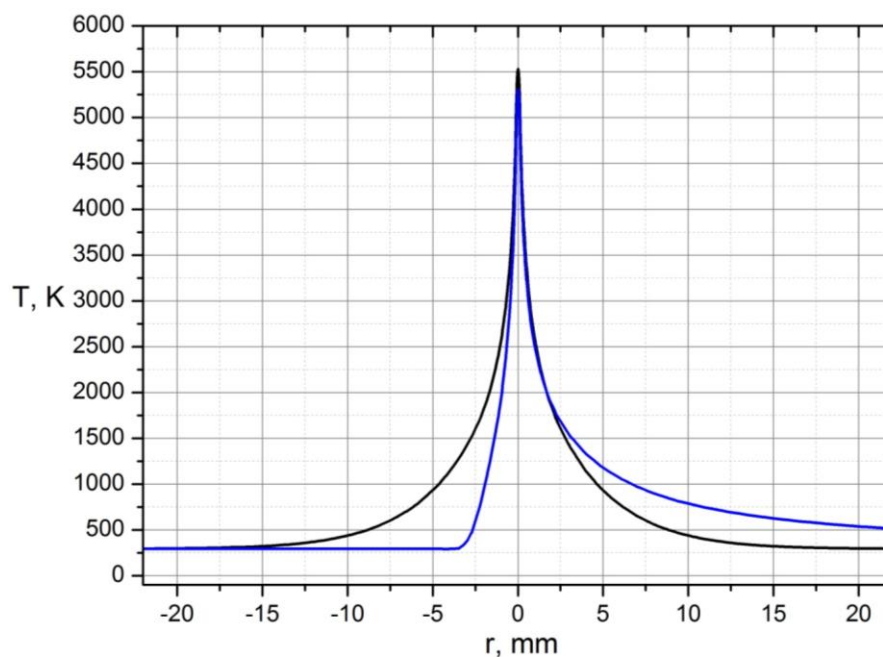


Рисунок 15. Радиальное распределение температур положительного столба разряда.

Ниже представлены термограммы столба разряда для указанных выше потоков воздуха.

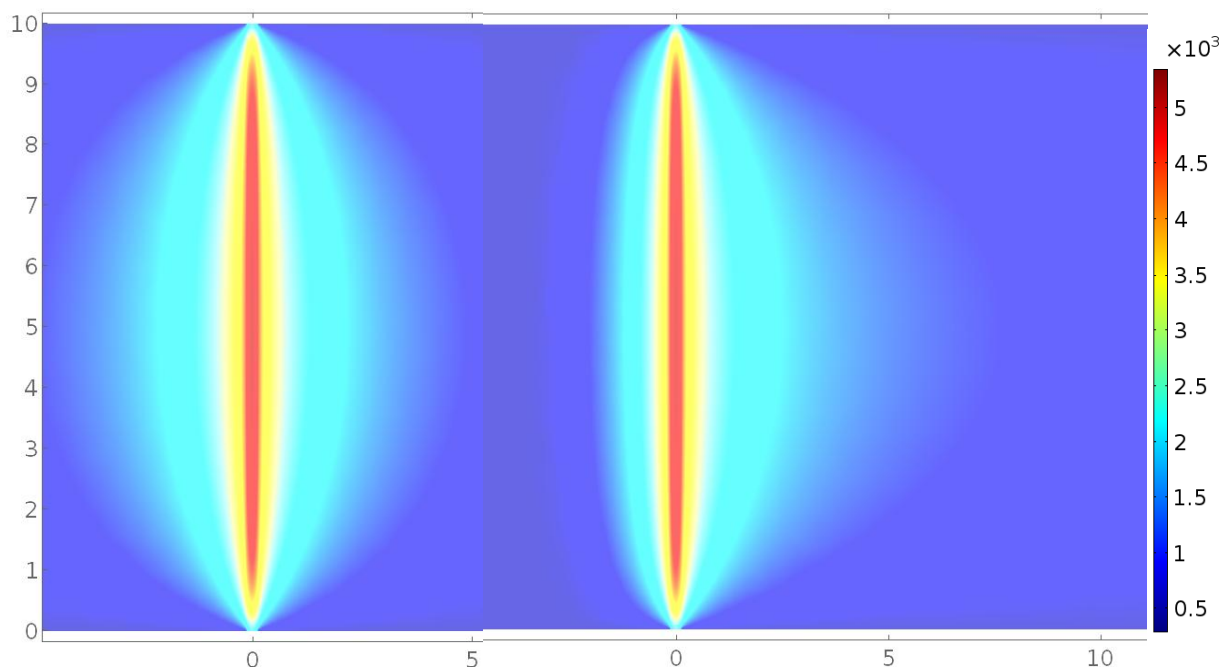


Рисунок 16. Термограммы столба разряда. Левый рисунок – без потока, правый – с потоком 5 м/с. Справа от рисунков представлена цветовая шкала температуры в кельвинах. Вдоль боковых сторон термограмм указаны координаты расчетной области в мм.

Представленная ниже двумерная модель коаксиального плазматрона показывает распределение температуры нейтральных частиц на оси плазматрона.

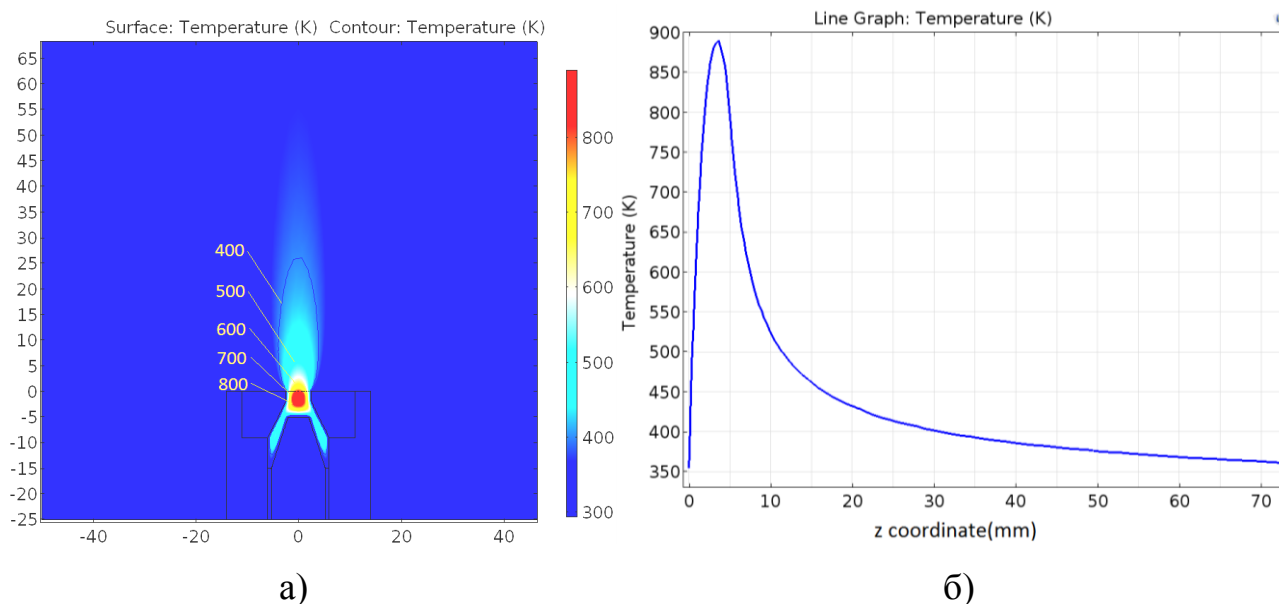


Рисунок 17. Температурное поле коаксиального плазматрона.

а – температурное поле; б – распределение температуры вдоль оси.

Данные, используемые для составления компьютерной модели, а именно - материалы и условия экспериментов, соответствуют экспериментальным. Вдоль боковых сторон рисунка 17,а указаны координаты расчетной области в мм.

Данное распределение температуры на оси соответствует экспериментальному на расстоянии более 5 мм от среза сопла. На Рисунке 17, б начало этой области соответствует координате $z = 10$ мм.

В действительности, распределение температуры на оси плазматрона носит сложный характер, имеется резкий градиент температуры, связанный с переходом от самостоятельного разряда к области плазменной струи на его основе. Однако полученных из модели данных достаточно для определения характера поддержания плазмы плазменной струи.

3.2 Моделирование электрического поля плазматрона

Учитывая сложность конструкции корпуса плазматрона, становится очевидным, что наиболее реальным способом для определения картины напряженности поля является компьютерное моделирование.

Компьютерная модель учитывает физические свойства среды и материалов плазматрона, а также их геометрию. Потенциал внутреннего электрода составляет ~ 1 кВ, что близко к величине напряжения горения разряда в условиях эксперимента. На представленном ниже рисунке изображено потенциальное поле плазматрона. Также на этом рисунке изображены эквипотенциальные поверхности, которые наглядно показывают резкий градиент потенциала. Все значения представлены в вольтах.

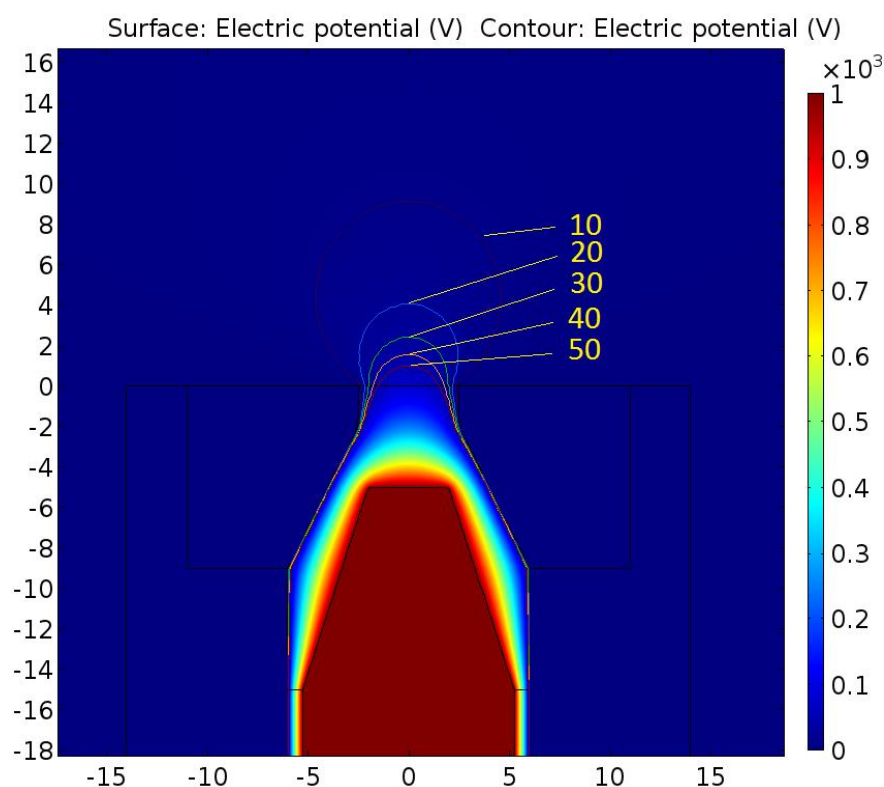


Рисунок 18. Поле напряжения плазматрона.

Зная значения потенциала в каждой точке пространства, строим картину напряженности электрического поля. Такая картина представлена на рисунке ниже.

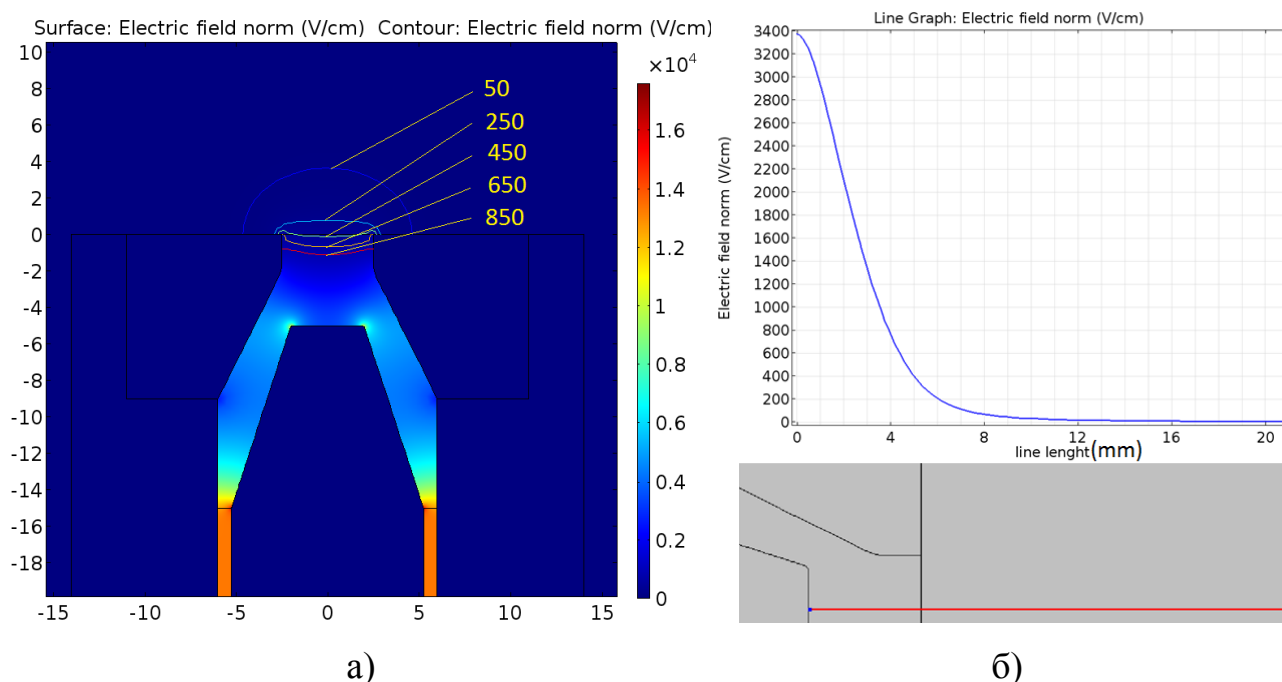


Рисунок 19. Напряженность электрического поля плазматрона.

а – картина напряженности; б – график распределения напряженности совместно с указанием расчетной области.

Наибольшее значение напряженности достигается в наименьшем зазоре между электродами и составляет 12-14 кВ/см, что является благоприятным условием для возникновения искровых разрядов.

Детальное распределение напряженности электрического поля на оси плазматрона представлено на рисунке 19, б. Наблюдается сильное ослабление поля. На удалении более 6 мм от среза сопла плазматрона, напряженность электрического поля составляет единицы вольт на сантиметр.

Данные компьютерного моделирования позволяют сделать вывод о том, что корпус плазматрона практически полностью экранирует создаваемое им электрическое поле. Помимо компьютерного моделирования этот факт подтверждается экспериментально – полностью отсутствуют электромагнитные помехи при работе электронных приборов и измерительного оборудования. В то же время, в случае открытой электродной системы, помехи могут достигать такой интенсивности, что вызывают серьезные сбои в работе окружающих электронных устройств.

3.3 Сопоставление результатов моделирования п 3.1 и 3.2

Опытным путем установлено, что горение самостоятельного газового разряда возможно в тех случаях, когда это отношение находится в интервале значений: (8...20) В/(см·торр) [15].

Целью данного раздела ВКР является определение области плазменной струи, в которой возможно поддержание самостоятельного разряда.

Компьютерная модель распределения температуры нейтральных частиц на оси плазматрона (рисунок 17), соответствует эксперименту на расстояниях более 5 мм от среза сопла. Моделирование процессов, происходящих внутри корпуса плазматрона, является комплексной и трудоемкой задачей, поскольку необходимо учитывать влияние множества факторов одновременно. Однако, имеющаяся упрощенная модель распределения температуры, позволяет определить эффективное давление газа (выражение 2), что в совокупности с распределением напряженности поля (рисунок 19), позволит выявить области самостоятельного разряда.

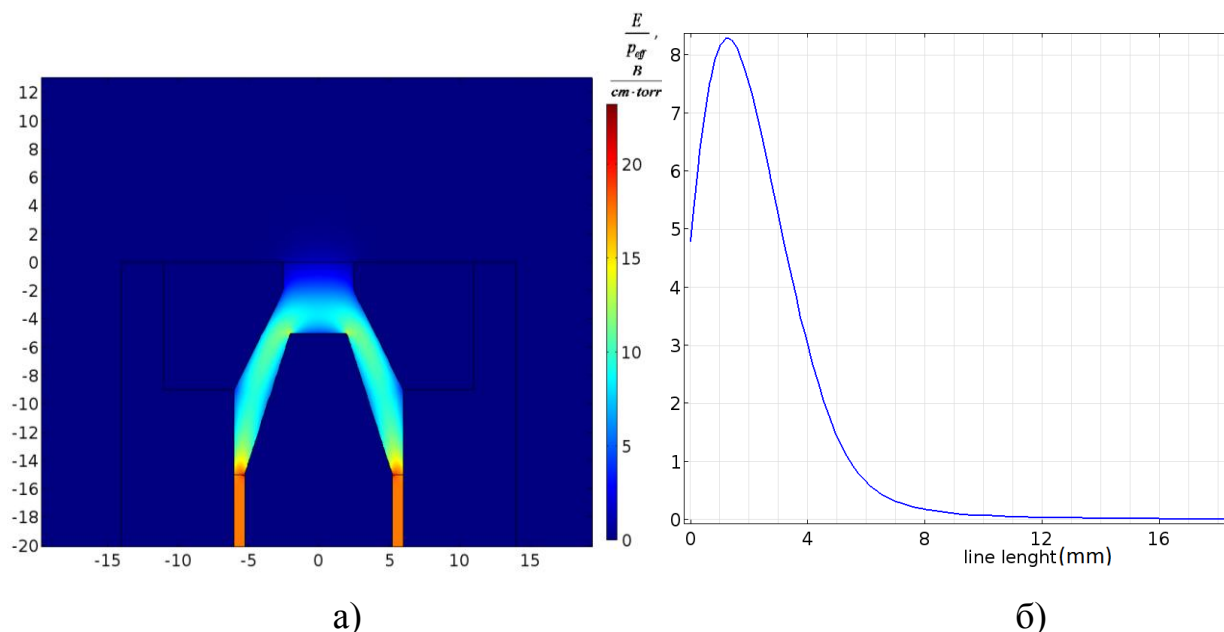


Рисунок 20. Картина Е/р плазматрона.

а) – Объемное распределение Е/р, б) – распределение Е/р на оси плазматрона.

С учетом данных п. 3.1 и 3.2, при температуре 900 К максимальное значение E/p на оси плазматрона составляет порядка 8 В/(см·торр). Это весьма мало для поддержания самостоятельного разряда [15]. Как уже отмечалось ранее, модельное распределение температуры плазматрона соответствует экспериментальному на расстоянии более 5 мм за срезом сопла. Это соответствует участку (рисунок 20, б) на удалении более 10 мм от начала координат. В этом случае, отношении E/p составляет десятые доли В/(см·торр) и поддержание плазмы в этих условиях крайне маловероятно. С другой стороны, при этом уже могут существовать комплексные молекулы и ионные кластеры с низкими энергиями связи.

В действительности, горение факела коаксиального плазматрона с коротким соплом сопровождается частичным смещением столба разряда за срез сопла. Катодное пятно имеет привязку на катод, а анодное свечение – на боковой грани сопла (рисунок 21). Положительный столб выгибается в результате взаимодействия с потока газа.

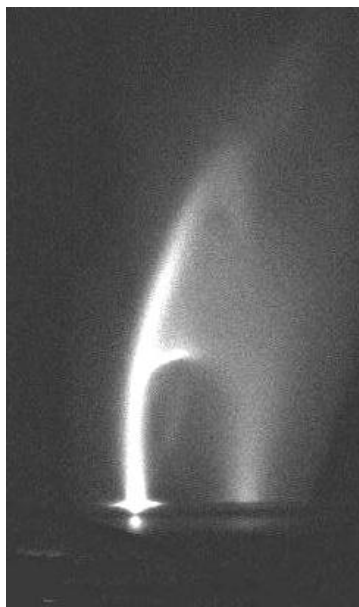


Рисунок 21. Область канала разряда и формирование плазменной струи.

$$I_{\text{disch}} \approx 0,2 \text{ A}; U \approx 800 \text{ В.}$$

Данная особенность позволяет сделать вывод о наличии в плазмотроне по меньшей мере двух областей: область самостоятельного газового разряда

(рисунок 21) и область плазменной струи, в которой свечение в оптическом диапазоне может быть обусловлено хемилюминесценцией и релаксацией возбужденных состояний молекул азота и оксидов азота [16].

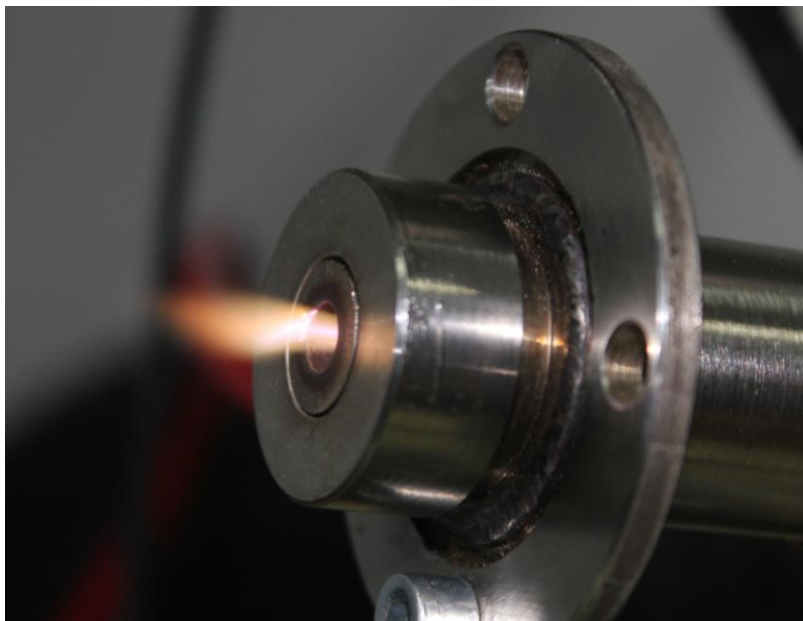


Рисунок 22. Фотография плазменной струи, получаемой в коаксиальном плазматроне. $I_{\text{disch}} \approx 0,2 \text{ A}$; $U \approx 800 \text{ В}$.

Кроме того, существуют различия в термодинамических параметрах положительного столба разряда и плазменной струи на его основе: температура положительного столба самостоятельного разряда достигает $(5000 \div 6000) \text{ К}$ - п. 3.1, а плазменной струи на его основе - на уровне 1000 К . Наличие в плазменной струе данных областей с резким градиентом температуры и различным химическим составом позволяет расширить возможности плазменной обработки с использованием слаботочного плазматрона, в зависимости от требуемых свойств.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью раздела выпускной квалификационной работы «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Задачи раздела:

- Произвести технико-экономическое обоснование НТИ,
- Осуществить оценку научно-технического уровня исследования;
- Составить план реализации НТИ,
- Сформировать бюджет исследования;
- Произвести оценку эффективности НТИ.

4.1 Инициализация НТИ

4.1.1 Техничко-экономическое обоснование НТИ

В рамках данной выпускной квалификационной работы проведено исследование скользящего тлеющего разряда в потоке воздуха.

Тлеющий разряд атмосферного давления в потоке газа – относительно новое и малоизученное физическое явление. Существующие многочисленные его применения свидетельствуют о том, что происходит постепенное внедрение плазменных технологий в производство. Несмотря на достигнутые успехи в области его практического применения, остается большой пласт неизученных процессов, происходящих в данном явлении. Существующие на данный момент способы практического применения рассматриваемого разряда, являются поверхностными, поскольку в большинстве случаев механизм воздействия плазмы с веществом малоизучен. Таким образом, фундаментальные исследования данного типа разряда и плазменной струи на его основе,

открывают новые возможности в производстве и многих других отраслях науки и техники.

Изучены особенности поддержания плазмы положительного столба разряда. Произведены оценки концентрации химически-активных частиц в плазменной струе. При помощи компьютерного моделирования определены области в плазменной струе плазматрона, в которых поддерживаются различные режимы горения разряда.

Результатами исследования являются:

- оценка концентрации химически-активных и заряженных частиц в плазме положительного столба и в плазменной струе;
- картина напряженности электрического поля плазматрона;
- определены области коаксиального плазматрона, в которых горение разряда наиболее благоприятно;
- расчет новой электрической схемы источника питания разряда, выполненной по типу полумостового инвертора.

4.1.2 Оценка научно-технического уровня исследования

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности проекта необходимо: рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле (3)

$$HTY = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Pi_i, \quad (3)$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 4 – Весовые коэффициенты НТУ.

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.5
Теоретический уровень	0.4
Возможность реализации	0.2

Таблица 5 – Шкала оценки новизны.

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 6 – Значимость теоретических уровней.

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	8
Разработка способа (алгоритм, вещество, устройство, программы)	6
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 7 - Возможность реализации по времени и масштабам.

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
Народное хозяйство	10

$$k_1 = 0.4, \Pi_1 = 8, k_2 = 0.4, \Pi_2 = 8,$$

$$k_3 = 0.4, \Pi_3 = 10, k_4 = 0.5, \Pi_4 = 2.$$

$$НТУ = 0.4 \cdot 8 + 0.4 \cdot 8 + 0.4 \cdot 10 + 0.5 \cdot 2 = 11.4$$

По полученным результатам расчета коэффициента научно-технического уровня можно сделать вывод, что данный проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, однако не используется в широком спектре отраслей.

4.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию

Планирование исследования – это составление календарных планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а так же трудовых и материальных ресурсов.

Основные задачи:

1. Взаимная увязка исследовательских работ;
2. Согласование выполнения отдельных этапов исследований во времени, определение их длительности и обеспечение их выполнения в установленные сроки;
3. Определение общего объема работ и потребных для его выполнения денежных, материальных и трудовых ресурсов;
4. Распределение общего объема работ между исполнителями.

Графический метод планирования.

При графическом методе планирования на основе расчета трудоемкости и календарной продолжительности выполнения всех включенных в план исследований с учетом их взаимосвязи и последовательности выполнения во временном масштабе (соответствующим производственному календарю планируемого года) строится графическая модель комплекса работ в виде линейной диаграммы, в которой положение и длина каждой линии характеризует дату начала (окончания) и продолжительность выполнения каждой работы. На основе линейного графика определяется общая продолжительность всего комплекса работ.

Определение трудоемкости и продолжительности работ осуществляется на основе отраслевых нормативов, типовых норм на разработку конструкторской документации, а для работ, обладающих большой неопределенностью на основе вероятностных (экспертных) методов, широко используемых в СПУ.

Таблица 8 – Этапы реализации проекта.

Содержание работ	Продолжительность работ, ожид/день			Исполнители
	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{ож}}$	
1. Разработка и утверждение плана работ	2	3	3	И, РП
2. Определение последовательности этапов исследования	1	2	2	И
3. Описание объекта исследования и ожидаемых результатов	2	4	3	И
4. Подготовка приборов и оборудования к проведению экспериментов	2	3	2	И
5. Проверка и отладка оборудования	1	3	2	И
6. Проведение серии экспериментальных исследований	2	4	3	И
7. Обработка экспериментальных данных	4	5	5	И
8. Интерпретация результатов, обсуждение	2	3	3	И, РП
9. Компьютерное	3	4	4	И

моделирование экспериментов				
10. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования	1	2	2	И
11. Оптимизация компьютерной модели с учетом экспериментальных данных	3	4	4	И
12. Составление программы расчета параметров плазменной струи	4	5	5	И
13. Утверждение результатов: расчеты, графики	3	5	5	И, РП
14. Расчет экономической части	5	6	6	И
15. Определение раздела техники безопасности	5	6	6	И
16. Отчет о проделанной работе	10	11	11	И, РП

График выполнения работ по дням составлен на год с учетом всех выходных, предпраздничных и праздничных дней в рисунке №

Ожидаемое время работы $T_{ож} = 66$ дней.

Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: инженера (И) – 66 дней; руководителя проекта РП - 22 дня.

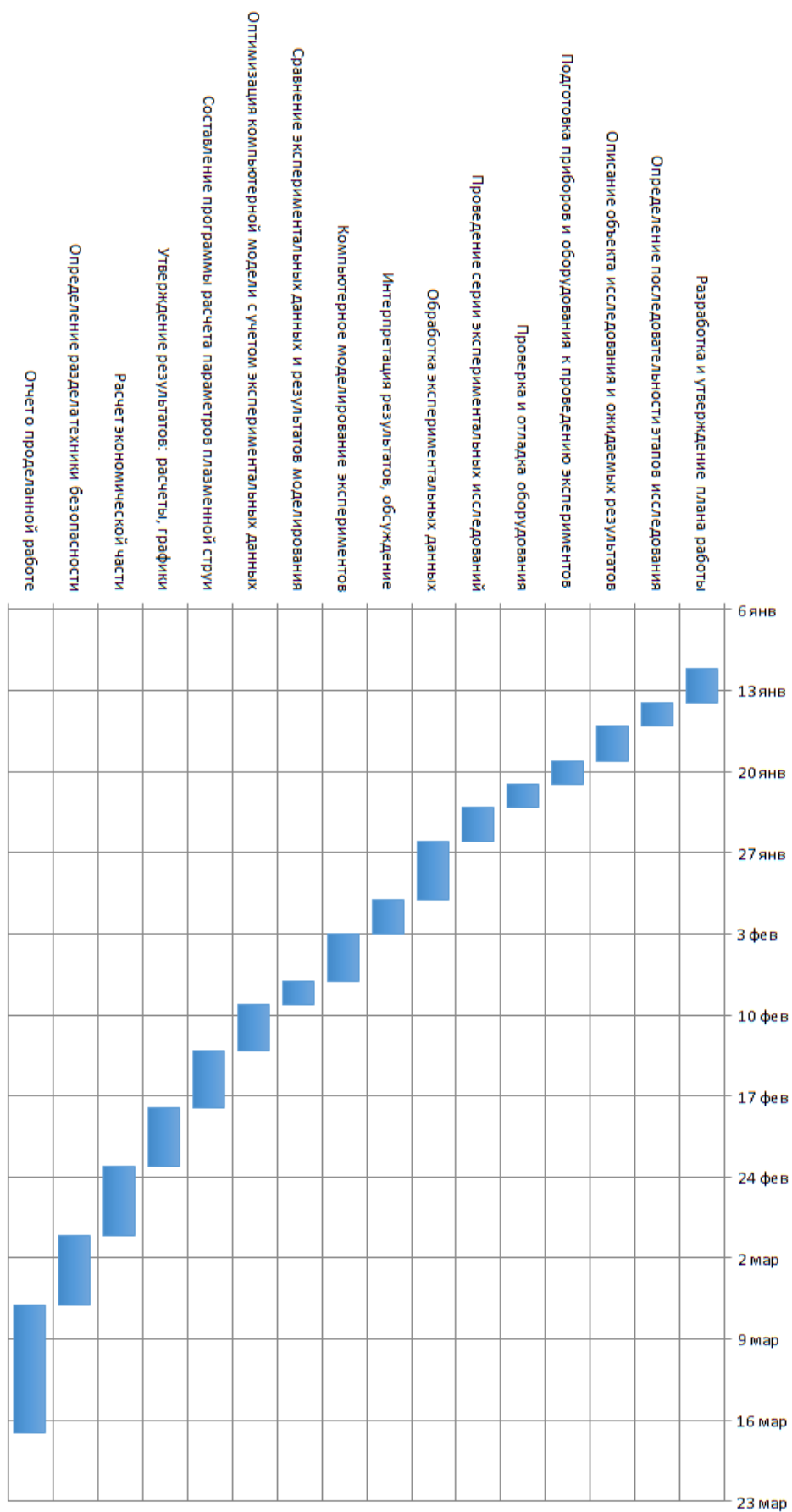


Рисунок 23. График Ганта.

4.3 Бюджет научно-технического исследования

4.3.1 Расчёт оплаты труда работников

Т.к. работа является научной, решено установить простую повременную форму оплаты труда. (Руководителю проекта устанавливается 4 квалификационная группа профессорско-преподавательского персонала, инженеру-электронику 1 квалификационная категория позволяющая выполнять задания уровня сложности средний и высокий.).

В таблице 9 приведены данные тарифной сетки для работников за единицу времени (час). Основная заработная плату сотрудников рассчитывается по формуле 4.

Таблица 9 – Данные для расчета заработной платы участников проекта.

№ п/п	Наименование категории работника	Группа	Количество работников	Форма оплаты труда	Ставка в месяц без РК	Стоимость проработанного часа (руб.)
1.	РП	4	1	повременная	40000	250
2.	Инженер-электроник	1	1		30000	187,5
3.	Итого		2			

Время работы каждого участника проекта представлено в таблице 10.

Находим районный коэффициент:

$$PK = 250 \cdot 176 \cdot 30\% = 13200 \text{ руб.}$$

$$ЗП_{осн} = 250 \cdot 176 + PK = 250 \cdot 176 + 13200 = 57200 \text{ руб.} \quad (4)$$

Проект включает в себя отчисления на страховые выплаты, которые рассчитываются по формуле 3.1.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (250 \cdot 176 + 0) = 13200 \text{ руб.} \quad (4.1)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), $З_{\text{доп}}$ – в нашем случае не предусмотрена, поэтому равняется нулю.

Таблица 10 – Основная заработная плата проектировщиков.

№ п/п	Работник	Почасовая ставка (руб.)	Количество отраб. часов	Районный коэфф. (руб.)	Отчисления на страховые выплаты	Заработная плата (руб.)
1.	РП	250	176	13200	13200	57200
2.	Инженер- электроник 1 кат.	187,5	528	29700	28700	127200
3.	Итого				41900	184400

4.3.2 Расчет капитальных вложений на реализацию проекта

Для реализации проекта, необходимы, помимо зарплат, вложения для производства инверторного преобразователя.

Капитальные вложения включают: затраты на приобретение электронных компонентов и расходных материалов, доставку, сборку прибора и его настройку.

Расчет капитальных вложений оформлен в виде таблицы 11:

Таблица 11 - Затраты на сборочные единицы источника питания.

Наименование	Кол -во	Цена, Руб	Общая стоимость , руб
Электронные компоненты			
- Выпрямительный диод КД206В;	4	130	520
- Резистор силовой АН-100, 100 Вт, 1 Ом;	1	620	620

- Конденсатор электролитический алюминиевый ЕСАР (K50-35), 2200 мкФ, 400В , В43458-А9228-М;	1	2 460	2 460
- Резистор металлооксидный МО-200 (С2-23) 2 Вт, 100 кОм, 5%;	3	3	9
- Конденсатор электролитический алюминиевый ЕСАР (K50-35), 2.2 мкФ, 400 В, 105°С, ТК 8Х11, ТК R2R2M2GF11;	2	12	24
- Конденсатор электролитический алюминиевый ЕСАР (K50-35), 10 мкФ, 400 В, 105°С, 10х20, В43851А9106М000;	2	30	60
-Транзистор IRGB14C40LPBF, IGBT 430В 20А зажигТО220;	2	130	260
- Сердечник ферритовый кольцевой М6000НМ, 45х28х12;	1	180	180
- Полумостовой драйвер IR2103PBF;	1	120	120
-Резистор SQP 10 Вт 10 Ом;	2	14	28
-Диод импульсный FR207;	48	4	192
- Катушка индуктивности SMD В82464G4104М, 100 мкГн, 1А;	1	85	85
- Конденсатор керамический дисковый DHRB34C102M2FB ;	10	58	580
- Резистор силовой АН-50, 50 Вт, 2.2 кОм;	10	180	1800
-Блок питания RS-25-12.	1	1430	1430
Материалы и прочее			
Расходные и вспомогательные материалы	1	3000	3000
Корпус прибора	1	2000	2000
Всего затрат			13368

П р и м е ч а н и е - Стоимость компонентов и материалов определены по среднерыночным ценам г. Томска на 14.03.2016 г.

4.4 Оценка ресурсной и организационной эффективности исследования

Результаты данной ВКР являются фундаментальным исследованием. Однако на сегодняшний день плазменные струи на основе тлеющего разряда в потоке газа широко используются, хотя и происходящие в них процессы остаются до конца не изученными. Как уже отмечалось в данной работе, плазменные струи на основе тлеющего разряда применяются в различных областях: промышленность, медицина, и т.д.. Оценка эффективности применения низкотемпературных плазменных струй произведена относительно процесса получения синтез-газа конверсией метана в плазме водяного пара и диоксида углерода. На данный момент распространение в химической промышленности получили каталитические методы конверсии метана в присутствии водяного пара, а также парциальное окисление кислородом. В результате получают синтез-газ (смесь CO и H₂), который используется в процессах синтеза жидких органических веществ на катализаторах. Наивысшие требования к качеству синтез-газа предъявляются в процессах синтеза Фишера–Тропша и метанола. Одним из перспективных методов получения синтез-газа с заданным соотношением H₂/CO является использование плазмы, которая позволяет достигать более высоких степеней конверсии метана при меньших затратах энергии.

Таблица 12 - Оценка организационной эффективности внедрения результатов разработки

Показатели организационной эффективности	Вес показателя K_i	Значение показателя до внедрения результатов разработки, балл a_i	Значение показателя до внедрения результатов разработки с учетом веса, $K_i \times a_i$	Значение показателя после внедрения результатов разработки, балл b_i	Значение показателя после внедрения результатов разработки с учетом веса, $K_i \times b_i$
Надежность	0,3	4	1,2	4	1,2
Наглядность	0,1	3	0,3	5	0,5

Быстродействие	0,2	3	0,6	5	1
Энергосбережение	0,2	4	0,8	5	1
Удобство эксплуатации	0,2	3	0,6	4	0,8
ИТОГО	1,00		3,5		4,5

Результаты анализа показали, что внедрение и эксплуатация слаботочного плазматрона позволит значительно повысить эффективность производственного цикла (3,5 балла до внедрения и 4,5 после).

Выводы по главе

В данном разделе ВКР «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены все поставленные задачи:

- Произведена оценка научно-технического уровня проекта и определено, что данный проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня.

- Осуществлено планирование работ в рамках НТИ. Ожидаемое время реализации исследования составляет 66 рабочих дней.

- Составлена смета НТИ. Общие расходы составили 197 768 рублей. Стоимость высоковольтного источника питания, необходимого для проведения НТИ, при этом составила 13 368 рублей. Расходы на заработную плату персонала с учетом страховых отчислений составляют 184 400 рублей.

Подводя итоги оценки использования нестационарного слаботочного плазматрона для производства синтез-газа по критериям ресурсоэффективности и ресурсосбережению, следует отметить, что по всем показателям и расчетам плазматрон вполне конкурентоспособен и его внедрение на производство позволит сэкономить затрачиваемую электроэнергию и сырье. Проект является ресурсоэффективным, имеет коммерческий потенциал.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Целью данного раздела является анализ и оценка вредных и опасных факторов, которые могут оказать воздействие на персонал, занимающийся проведением исследований на лабораторном стенде для получения и исследования скользящего тлеющего разряда в потоке газа. Так же рассмотрены вопросы, касающиеся непосредственно техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даны рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

5.1 Производственная безопасность

В ходе анализа лабораторного стенда и режимов его работы, были выявлены следующие опасные и вредные факторы, которые представлены в таблице 13.

Таблица 13. Опасные и вредные факторы при проведении работ со стендом для получения и исследования скользящего тлеющего разряда в потоке газа.

Источник фактора	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Источник высокого напряжения для питания разряда; Плазменная струя на основе тлеющего разряда; Работа в помещении;	1. Отклонение показателей микроклимата в помещении; 2. Превышение уровня шума; 3. Повышенное содержание озона в воздухе; 4. Недостаточная освещенность. 5. Отклонение параметров микроклимата.	1. Термическое поражение; 2. Электрический ток.	Параметры микроклимата СанПиН 2.2.4-548-96, ГОСТ 12.1.005-88; Допустимые уровни шума ГОСТ 12.1.003-83; Содержание озона ГН 2.1.6.695-98; Требования к освещенности помещения СН 245-71 и СНиП 23-05-95.

Анализ опасных факторов

Электрический ток

В основе работы данного лабораторного стенда лежит горение тлеющего разряда атмосферного давления. Для получения газового разряда необходим источник высокого напряжения. В зависимости от целей и методов проведения экспериментов, величина постоянного высокого напряжения может варьироваться от единиц до десятков кВ. В нашем случае, рабочее напряжение составляет 4-5 кВ.

Необходимость соблюдения правил электробезопасности всегда была актуальна при работе с электроустановками. Однако при работе с повышенным напряжением, риск поражения электрическим током существенно возрастает, поскольку электрический удар может произойти без прямого контакта человека с оборудованием. Электрический ток высокого напряжения оказывает на человека термическое воздействие, вызывает сбои в работе сердца, вплоть до его остановки. Удар током может вызвать сбой в работе нервной системы, например, беспорядочные сокращения мышц. Повторяющиеся удары могут вызвать невропатию. Острая электротравма может стать причиной нарастающей асистолии.

Важнейшим и обязательным условием работы персонала со стендом является наличие группы допуска по электробезопасности не ниже четвертой. Для получения группы необходимо обучение, с последующей сдачей экзамена и выдачей соответствующего удостоверения.

Помимо группы допуска у персонала, необходимо проведение специальных мер по обеспечению электробезопасности на рабочем месте. Эти меры включают в себя:

- заземление корпуса плазматрона;
- отсутствие токоведущих частей установки в открытом состоянии.

На рисунке ниже представлена схема заземления плазматрона. Электроустановка скомпонована таким образом, что электрод плазматрона, находящийся под напряжением, находится внутри заземленного электрода.

Данное решение позволило практически полностью исключить непреднамеренное поражение персонала электрическим током.

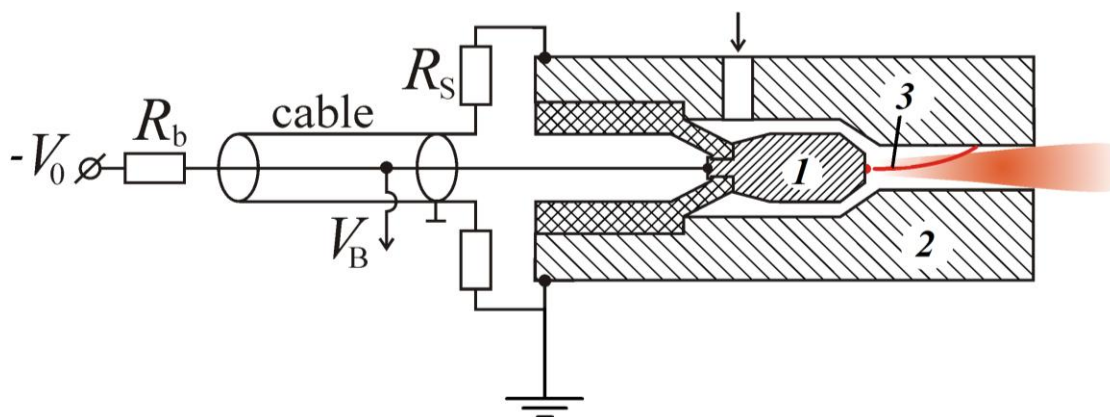


Рисунок 24 - схема заземления плазматрона. 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазменный факел.

Поражение током в данном случае может возникнуть только в случае засовывания металлических предметов в сопло плазматрона, либо при нарушении целостности изоляции токоведущих кабелей.

Термическое поражение

Возможно получение термического ожога при неосторожной работе с данной электроустановкой. Термическое поражение может возникнуть в двух случаях: поражение электрическим током и при длительном воздействии плазменной струи на живую ткань. Не исключено получение ожогов при непосредственном контакте с корпусом плазматрона после длительной его работы.

Анализируя тепловое воздействие плазматрона, можно заключить, что наиболее тяжелая возможная степень ожога при неосторожной работе – вторая. Повреждается ороговевший эпителий до росткового слоя. Формируются небольшие пузыри с серозным содержимым. Полностью заживают за счёт регенерации из сохранившегося росткового слоя за 1—2 недели. Тем не менее, существует ряд мероприятий, позволяющих предотвратить термическое поражение персонала:

- не подставлять руки на расстояние менее 5 см от среза сопла на длительное время;

- после/во время длительной работы плазматрона не допускать прикосновение к его нагретому корпусу без защитных перчаток;
- не допускать длительного воздействия плазменной струи на живую ткань.

В некоторых случаях возможно поражение электрическим током через плазменную струю. Это может возникнуть в случае, если подставить конечность максимально близко к срезу сопла. В этом случае разряд перекинется с анода на тело человека. Для исключения этого явления, необходимо не допускать контакта с плазменной струей вблизи среза сопла.

Анализ вредных факторов

Превышение уровня шума

Повышенный уровень шума при работе с электроустановкой обусловлен циклическими обрывом и новым инициированием разряда. Частота цикла составляет 50-1000 Гц, в зависимости от скорости потока газа. В результате данных режимов работы, средняя величина звукового давления на рабочем месте составляет 75-80 дБ, что является допустимым значением для рабочего места. Учитывая кратковременность проведения экспериментов, можно заключить, что данный вредный фактор не оказывает существенного вреда организму персонала. Тем не менее, данный фактор является нежелательным. Для устранения воздействия шума при работе установки рекомендуется использовать специальные звукоизолирующие наушники.

Повышенное содержание озона в воздухе

В процессе работы стенда происходит активная генерация химически-активных атомов и молекул на основе азота и кислорода. Значительную долю химически-активных частиц составляет монооксид азота, который оказывают положительное воздействие на заживление ран, а также участвуют в процессе обмена веществ. Данное соединение не является вредным, или отравляющим веществом.

Вместе с тем, происходит активная генерация молекул озона. Высокая окисляющая способность озона и образование во многих реакциях с его участием свободных радикалов кислорода определяют его высокую токсичность. Воздействие озона на организм может приводить к преждевременной смерти.

Наиболее опасное воздействие высоких концентраций озона в воздухе:

- на органы дыхания прямым раздражением;
- на холестерин в крови человека с образованием нерастворимых форм, приводящим к атеросклерозу;
- на органы размножения у самцов всех видов животных, в том числе и человека (вдыхание этого газа убивает мужские половые клетки и препятствует их образованию). При долгом нахождении в среде с повышенной концентрацией этот газ может стать причиной мужского бесплодия.

Озон в Российской Федерации отнесён к первому, самому высокому классу опасности вредных веществ [17]. Нормативы по озону:

- предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны 0,1 мг/м³.

При этом, порог человеческого обоняния приближённо равен 0,01 мг/м³.

Необходимым мероприятием для устранения воздействия данного фактора на персонал является вытяжная вентиляция лаборатории.

Недостаточная освещенность

Естественное и искусственное освещение производственных помещений должно обеспечивать освещенность, достаточную для безопасного выполнения работ, пребывания и передвижения людей.

В рабочих помещениях рациональное освещение играет чрезвычайно важную роль, так как при правильной организации оно способствует уменьшению зрительного утомления и улучшению функционального состояния организма, обеспечивает благоприятную санитарную обстановку труда и благоустройство рабочих помещений. Независимо от типа освещения, оно должно обеспечить достаточный уровень освещенности и равномерное распределение света на

рабочих местах и в рабочих помещениях, защиту глаз от слепящего действия источников света и от чрезмерно высоких яркостей, наконец, наиболее благоприятный для глаза и организма спектр источников света.

Анализируя характер работ, проводимых с лабораторным стендом, можно сделать вывод, что в соответствии с [19] категория работ относится к III классу. Это означает, что размер объекта различия при работе составляет от 0,3 до 1 мм. Контраст объекта с фоном является большим. Тогда требования, предъявляемые к искусственному освещению следующие: наименьшая освещенность, при использовании люминесцентных ламп в случае комбинированного освещения, составляет 400 лк, либо 150 лк при общем освещении. Используя лампы накаливания, необходимо обеспечить 200 лк при комбинированном освещении и 50 лк при общем.

Отклонение параметров микроклимата.

Работа с рассматриваемой электроустановкой относится к легкой I-б. В соответствии [18] для данного типа работ установлены следующие требования к микроклимату помещения:

- Оптимальная температура в теплое время года составляет 22-24 °С, а в холодное 21-23 °С;
- Относительная влажность воздуха 40-60 % вне зависимости от времени года, допускается 70% в холодное время года;
- Скорость движения воздушных потоков в холодное время года составляет 0,1 м/с; в теплое время года – 0,2 м/с.

5.2 Экологическая безопасность

Данная электроустановка является полностью безопасной для окружающей среды, поскольку в ее работе отсутствуют загрязняющие атмосферу выбросы. Образующиеся в процессе работы установки химически-активные частицы имеют время жизни от нескольких секунд до нескольких минут, а продукты их распада – кислород и азот, являющиеся основой для воздуха.

Отходы, образующиеся в процессе работы установки, представляют собой оксидные пленки на поверхностях электродов.



Рисунок 25. Изношенные электроды.

Для продолжения работ с плазматроном, необходима замена электродов на новые. Старые электроды подлежат утилизации, либо переплавке.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Были выявлены следующие возможные чрезвычайные ситуации при работе со стендом:

- взрыв газового баллона;
- пожар;
- превышение ПДК отравляющих веществ в помещении.

Газовый баллон является составной частью лабораторного стенда. Он необходим для создания потока воздуха, либо газа. Применяемый газовый баллон имеет объем 40 литров и произведен в соответствии с ГОСТ 949-73. Обязательным условием безопасной эксплуатации данного баллона является соблюдение требований по рабочему давлению и надлежащих условий хранения.

Пожар является одним из вероятных ЧС при работе с лабораторной установкой. Он может возникнуть вследствие следующих факторов:

- короткое замыкание;
- искрение в местах неплотно прилегающих токоведущих частей;
- плохой электрический контакт электрических соединений;
- нахождение горючих и легковоспламеняющихся предметов вблизи плазменной струи.

Наиболее действенным мероприятием по защите от короткого замыкания в работе установки является оборудование ее системой предохранителей, а также защитными реле. К профилактическим мерам по защите от короткого замыкания относятся:

- регулярная проверка исправности электрической изоляции оборудования;
- своевременное устранение выявленных недостатков;
- не допускать механических воздействий на изоляцию оборудования.

Искрение в местах неплотно прилегающих токоведущих частей, в совокупности с наличием пыли и прочих загрязнений, может стать причиной возникновения пожара. Для устранения данного фактора необходимо устранять указанные выше недостатки. Необходимые профилактические меры:

- периодический осмотр электронных компонентов оборудования на предмет искрящих промежутков;
- регулярная чистка оборудования от пыли и прочих загрязнений;

-своевременное устранение выявленных недостатков.

Осмотр и чистку оборудования следует производить персоналу с группой допуска не ниже 4й.

Плохой электрический контакт является одной из наиболее частых причин возникновения пожара. В местах неплотного контакта может происходить сильный нагрев деталей, способный привести к возгоранию.

Температура плазменной струи, возникающей при работе стенда, может достигать 1500 К. Наличие легковоспламеняющихся и горючих материалов вблизи плазменной струи может стать причиной их возгорания. Очевидно, что для устранения возможности возникновения пламени, необходимо держать легковоспламеняющиеся материалы вдали от плазменной струи.

Действия в случае угрозы взрыва

Взрыв – это процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени.

Взрыв приводит к образованию и распространению ударной волны с избыточным давлением, оказывающей механическое воздействие на окружающие предметы. Основные поражающие факторы взрыва: воздушная ударная волна и осколочные поля, образуемые летящими обломками разрушенных объектов, технологического оборудования, взрывных устройств. При угрозе взрыва необходимо немедленно покинуть помещение, защищая голову руками, подальше от источника взрыва. Если произошел взрыв, принять меры к обесточиванию электроустановки с целью недопущения пожара и других чрезвычайных ситуаций; оказать первую помощь пострадавшим.

Действия при пожаре

Часто пожару предшествует задымление. При обнаружении пожара, либо задымления, необходимо в первую очередь обесточить помещение и сообщить о пожаре по телефону 01, а также всему работающему персоналу. При помощи персонала обеспечить эвакуацию объекта и недопустить распространение пламени.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В результате проведенного анализа вредных и опасных факторов, а также возможности возникновения различных ЧС при работе со стендом, были определены основные требования к рабочей зоне:

- наличие исправной вытяжной вентиляции в помещении;
- наличие системы предохранителей и аварийного отключения питания;
- обеспечение электромагнитной совместимости оборудования;
- наличие специальных звукозащитных наушников на рабочем месте.

Работающая вытяжная вентиляция в процессе работы с лабораторным стендом практически полностью исключает возможность отравление персонала озоном. Производительности вытяжной вентиляции вполне достаточно для полного устранения всех химически-активных частиц из лаборатории.

Система аварийного отключения питания является обязательной частью любой электроустановки. Использование предохранителей и защитного реле позволит своевременно обесточить электроустановку в случае возникновения короткого замыкания.

Обеспечение электромагнитной совместимости на рабочем месте состоит в правильном заземлении использующегося электрооборудования, а также гальванической развязке высоковольтных частей установки электроизмерительных приборов. Использование защитных экранов (металлический корпус источника питания и заземленный анод плазматрона) практически полностью устраняют электромагнитное излучение, возникающее при работе электрооборудования.

Для устранения шумового воздействия в процессе работы на персонал необходимо наличие на рабочем месте специальных звукоизолирующих наушников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной ВКР является изучение скользящего тлеющего разряда в потоке воздуха атмосферного давления и плазменных струй, получаемых на основе этих разрядов. Результатами работы являются оценочный расчет параметров плазмы положительного столба тлеющего разряда, а также компьютерная модель электростатического и теплового полей слаботоочного плазматрона.

Освоен пакет программ COMSOL Multiphysics применительно к построению моделей теплового и электрического полей. Смоделированы тепловые поля коаксиального плазматрона и положительного столба разряда.

В рамках теоретической части выявлены характерные особенности тлеющего разряда и установлено его место относительно других типов разряда. Проведенный литературный обзор и анализ текущих исследований и практического применения рассматриваемого типа разряда, свидетельствуют о том, что существует необходимость дальнейших фундаментальных исследований физики газоразрядной плазмы.

В экспериментальной части представлены данные по измерению параметров разряда, результаты компьютерного моделирования, а также результат анализа данных, полученных в ходе моделирования.

Проведенный анализ научно-технического уровня исследования, в рамках раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», показал, что исследование имеет высокую значимость не только для теоретических исследований, но и для прикладных областей плазменной техники, однако не используется в широком спектре отраслей.

В рамках раздела «социальная ответственность» определены опасные и вредные факторы, имеющие место в работе с лабораторным стендом. Разработаны профилактические меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций при работе со стендом, а также необходимые меры безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лопатин И. В. Ахмадеев Ю. Х., Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика, Физика. Азотирование образцов титановых сплавов в плазме тлеющего разряда с полым катодом, Выпуск № 5 (100) / том 22 / 2011
2. История электротехники [Электронный ресурс] / под общей редакцией академика РАН и АЭН РФ И.А. Глебова. – Режим доступа: <http://coollib.com/b/314568/read> 30.12.2015 г. – Загл. с экрана
3. Кудрявцев С.П. , Д.Д. Томсон (Серия: «Люди науки»). – М.: Просвещение, 1986. – 80 с.
4. Кудрявцев П.С. История физики. Том III: От открытия квант до квантовой механики. М.: Просвещение, 1971. – 424 с.
5. Ермолаева С.А. , Варфоломеев А.Ф. , Чернуха М.Ю. , Journal of Medical Microbiology (2011), 60, 75–83, Bactericidal effects of non-thermal argon plasma invitro, in biofilms and in the animal model of infected wounds
6. Deminsky M., Jivotov V., Potapkin B. and Rusanov V. Plasma-assisted production of hydrogen from hydrocarbons. Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 3, pp. 413–418, 2002.
7. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Т.2. М., 1971. С.292-332.
8. Энгель А. Ионизованные газы. М., 1959. (гл.7, §1, гл.8, §3 , 5, С.179, 224-247)
9. Радиофизическая электроника / Под.ред. Н.А.Капцова. М., 1960. С. 371-384, 462- 474, 487-494.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.
11. Специальный практикум по газовой электронике и физике плазмы. Ч1/Под ред. Г.С.Солнцева. – М., Изд.МГУ, 1988.
12. Gururaj,T., Subasri, R ., Raju,K .R .C., Padmanabham, G. (2011). Effect of plasma pretreatment on adhesion and mechanical properties of UV-curable coatings on plastics. Applied Surface Science, 257(9), 4360-4364.

13. Великодный В.Ю., Беркова М.Д., Воротилин В.П., Гриши В.Г. Плазменные технологии очистки сточных вод // Прикладная физика. М., 2008.
14. Mechanism for initiation of pseudospark discharge by an ion beam injected from anode side / Yu. D. Korolev, O.B. Frants, I.A. Shemyakin, V.G.Rabotkin, V.D. Bochkov, K. Frank, A.I. Kuzmichev, D.A. Kuzmichev // Proc. XXIV Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. □Warsaw, Poland, □ Vol. III. □ P.57 □ 58, (1999)
15. Korolev Y.D., Frants O.B., Geyman V.G., Kasyanov V.S., Landl N.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2012. – V. 40. – No. 11. – P. 2951–2960.
16. И.А. Шемякин, Ю.Д. Королев, Исследование плазмы факела нестационарного слаботочного плазмотрона. Известия высших учебных заведений, т.53 № 3/2 2013, с. 255
17. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
18. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
19. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.