

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники

УДК 533.9.072

Барахоев
Андрей Леонидович

Исследование электрофизических характеристик разряда атмосферного
давления

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-38 80 03 Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

Научный руководитель
Бордусов Сергей Валентинович
профессор кафедры ЭТТ
профессор; доктор технических наук

Минск 2018

ВВЕДЕНИЕ

Барьерный разряд (БР) – это разряд в газовой среде, заполняющей промежуток между электродами, один или оба из которых покрыты диэлектриком. При приложении к электродам переменного напряжения в газе возникает электрическое поле, определяемое приложенным к электродам напряжением и зарядами на поверхности диэлектрика. Разряд возникает, если это поле превышает поле пробоя.

Широкое применение барьерного разряда в технике обуславливается возможностью возбуждения неравновесной низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении, что значительно снижает стоимость технологических процессов с их применением и упрощает их.

В течение последнего десятилетия применение источников плазмы атмосферного давления было очень успешными в различных практических применениях, таких как очистка поверхности, их модификация и стерилизация. В последнее время интенсивно изучается возможность применения плазмы атмосферного давления для тонкопленочного осаждения и травления. Впервые эти разряды нашли широкое применение при производстве озона. Сейчас их используют при стерилизации медицинского оборудования, при создании плазменных панелей, а также в эксимерных лампах. Кроме того, в плазме барьерного разряда проводят модификацию поверхностей материалов, активацию, обработку семян сельскохозяйственных культур, медицинских инструментов, а также используют барьерный разряд для очистки вод и их озонирования, при невозможности хлорирования; также плазму барьерного разряда используют для получения УФ-излучения, для обеззараживания и заживления ран и язв.

Достоинством барьерного разряда по сравнению с другими типами разрядов атмосферного давления является отсутствие деструктивного воздействия на обрабатываемый объект, что обусловлено малым объёмным энерговыделением в разряд из-за ограничения разрядного тока диэлектриком. Применение электрических разрядов низкого и атмосферного давления позволяет в широком диапазоне варьировать параметры плазмы и выбирать оптимальные условия обработки в зависимости от свойств тестируемого материала.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Цель работы:

Изучение особенностей возбуждения и поддержания разряда барьерного типа атмосферного давления, исследование его электрофизических характеристик.

Актуальность темы магистерской диссертации:

При помощи барьерного разряда можно целенаправленно получать химически и энергетически активные частицы при атмосферном давлении. Применение плазменной обработки при атмосферном давлении для целей технологии в биотехнологиях, медицине, производства изделий интегральной электроники и др. в настоящее время является активно развивающейся отраслью как научных исследований, так и практического применения.

Задачи исследования:

1. Подбор информации и проведение обзора конструктивных решений газоразрядной системы барьерного типа;
2. Подбор информации и анализ физико-химических характеристик разряда барьерного типа;
3. Изучение электрофизических характеристик разряда барьерного типа в атмосфере воздуха;
4. Исследование области послесвечения разряда барьерного типа при атмосферном давлении.
5. Исследование применения разряда барьерного типа для очистки поверхностей биополимерных материалов от загрязнения мицелием и спорами грибов вида *Aspergillus*.

Область исследования:

Разряд барьерного типа атмосферного давления.

Предмет исследования:

Электрофизические характеристики разряда барьерного типа атмосферного давления.

Новизна работы:

Проведены измерения концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц разряда барьерного типа атмосферного давления на различном расстоянии от плазмообразующей зоны. Выявлена большая по сравнению с плазмой разряда в вакууме эффективность применения разряда барьерного типа атмосферного давления для очистки биополимерных материалов от загрязнения мицелием и спорами грибов вида *Aspergillus*.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты исследований оптических и электрофизических характеристик разряда барьерного типа атмосферного давления при питании барьерного разряда электрическими импульсами с амплитудой 30 кВ, частотой следования – 200 Гц, средним значением тока – 0,1 мА, вкладываемой в разряд мощностью – 2 Вт, удельной мощностью – 0,3 Вт/см²;

– результаты исследования зависимости концентрации заряженных частиц послесвечения барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Измерения проводились на расстояниях $l=5, 10, 15, 20, 25$ сантиметров от разрядной системы с шагом по времени приблизительно равным $t \approx 1$ секунда.

– результаты исследований с применением барьерного разряда для деконтаминации биополимерных материалов. Время обработки – 30 мин., частота следования импульсов – 1 кГц на расстоянии 2 мм от образца до разрядной трубки. После воздействия плазмы численность микроскопических грибов и бактерий значительно снизилась.

– спектроскопия показала, что температура тяжёлых частиц не высока и, следовательно, деградация объекта обработки (в частности бумаги) происходить не будет. Что и было подтверждено экспериментальным путём.

Апробация результатов диссертации:

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях: 26-я международная молодежная научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (ФКС-XVI): Гродно, РБ, 2018; 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: Минск, 2018.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка. Объем магистерской диссертации составляет 59 страниц, включая 40 иллюстраций, 2 таблицы, библиографический список из 22 наименований, 2 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первая глава диссертационной работы имеет обзорный характер. Рассматриваются теоретические особенности возбуждения разряда барьерного типа.

Барьерным называют разряд, протекание тока в котором ограничено, по крайней мере, одним слоем диэлектрика, а характерные размеры электродов существенно превышают величину межэлектродного промежутка. Плазма барьерного разряда имеет ряд характерных особенностей, а именно: высокое давление (сотни Тор и выше), пространственную неоднородность и малую длительность протекания различных физико-химических процессов. Как правило, наряду с объёмным разрядом в плазме наблюдаются хаотически расположенные микроразряды (филаменты), длительность протекания тока в которых не превышает 10-50 нс. Плазма барьерного разряда сильно неравновесная, средние температуры электронов могут достигать нескольких электронвольт, в то время как температура газа остаётся близкой к температуре диэлектрических барьеров.

В явном виде отсутствует зависимость напряжения возникновения разряда от частоты импульсов, это объясняется тем, что частота и длительность импульсов больше критического времени развития разряда.

В зависимости от рабочего газа, поверхностных свойств диэлектрика и условий работы барьерный разряд может существовать в двух различных режимах: диффузном и филаментарном.

Механизм, объясняющий пробой газового промежутка в виде большого количества ограниченных ярких токовых филаментов, сводится к следующему. При атмосферном давлении, вследствие высоких скоростей столкновений, в процессе роста электронной лавины у головы лавины генерируется достаточная плотность зарядов уже после прохождения лавиной достаточно малых расстояний. Локальное «собственное поле» возникающее вследствие разделения зарядов из-за разницы в дрейфовых скоростях электронов и ионов накладывается на внешнее поле. Столкновительная ионизация в области высокого поля у головы стримера приводит к быстрому распространению области ионизации и формированию яркого плазменного канала. Скорость стримера лежит в пределах 10^7 - 10^8 см/с и радиус распространения головы стримера и ионизированного канала составляет примерно 0,01-0,1 см. В соответствии с модельными расчётами величина приведенного электрического поля у головы стримера может достигать 500-800 Тд (1 Тд соответствует 10^{-17} В·см²), это значение в

несколько раз превышает значение приведенного электрического поля при таунсендовском пробое (100-200 Тд). Наиболее вероятным процессом, обеспечивающим первоначальные электроны для распространения стримера является ультрафиолетовая ионизация газа впереди стримера. Начальные фазы пробоя в барьерном разряде похожи на пробой в разрядах без диэлектрика. Когда стример достигает диэлектрического барьера доминирующей чертой барьерного разряда становится осаждение зарядов на диэлектрическую поверхность. После достижения стримером барьера область катодного падения с высоким полем формируется за доли наносекунды. При атмосферном давлении длина этого поля в области определяемой поверхностным зарядом. Этот эффект самоограничения ограничивает длительность микроразряда несколькими наносекундами, типичная величина перенесенного заряда 100 пКл, диссипированная энергия – доли мкДж (для промежутка 1 мм при давлении 760 Тор). Канал микроразряда имеет грибообразную форму. Узкий конец канала расположен на катоде. Вблизи диэлектрического анода канал резко расширяется. Температура газа в микроразряде повышается всего на несколько Кельвин, в то время как температура электронов достигает нескольких эВ, концентрация электронов – 10^{14} см^{-3} , плотность тока – $1000 \text{ А}\cdot\text{см}^2$. Всё это позволяет характеризовать микроразряд как *кратковременный тлеющий разряд высокого давления*.

В гелии и его смесях с азотом и воздухом часто наблюдается диффузный барьерный разряд (atmospheric pressure glow discharge). Наиболее важным процессом при появлении диффузного барьерного разряда является скорость ионизации (включая двухступенчатую ионизацию и все процессы прилипания и отлипания электронов) в момент пробоя. Важным параметром газа является эффективный приведенный ионизационный коэффициент α_{eff}/n , а более точно его частная производная по приведенному полю. Эта величина определяет радиус распространяющегося стримерного канала. Чистый гелий имеет экстремально низкое значение этого параметра около пробоя. Это проявляется в образовании широких стримерных каналов, перекрывающих друг друга, что легко приводит к формированию диффузного разряда. На ионизационные эффекты сильное влияние оказывает наличие примесей, газовых добавок, остаточных метастабилей, электронов и ионов.

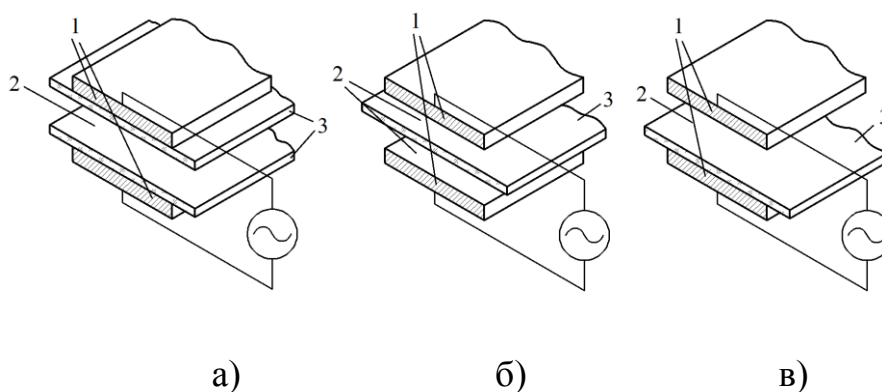
Таким образом можно сделать вывод, что форма горения и напряжение возникновения барьерного разряда сильно зависит от ряда факторов, таких как, например, рабочий газ, диэлектрическая проницаемость барьера и его

поверхностная структура. Также можно сказать, что барьерный разряд является сильно неравновесным быстропротекающим разрядом. В зависимости от разнообразия свойств газов, рабочих параметров и граничных условий, барьерный разряд может реализовываться в виде серий микроударов, самоорганизованных регулярных разрядных структур или иметь полностью диффузный характер.

Во второй главе рассмотрены конструктивные решения газоразрядных систем барьерного типа и некоторые технологические приложения плазмы низкотемпературного неравновесного разряда.

В зависимости от конфигурации электродов и диэлектрических барьеров, различают три типа барьерного разряда: объёмный, поверхностный и копланарный.

На рисунке 1 изображены конструкции разрядных систем с плоскопараллельными электродами. При этом диэлектрический барьер 3 может покрывать оба электрода (рисунок 1 а), разделять разрядный промежуток на две части, выступая самостоятельным элементом (рисунок 1 б), либо покрывать только один электрод (рисунок 1 в). На рисунке 2 – с коаксиальными цилиндрическими электродами. Как и в случае конструкций с плоскими электродами, диэлектрическим слоем может быть покрыт один (рисунок 2 а) или оба электрода (рисунок 2 б).

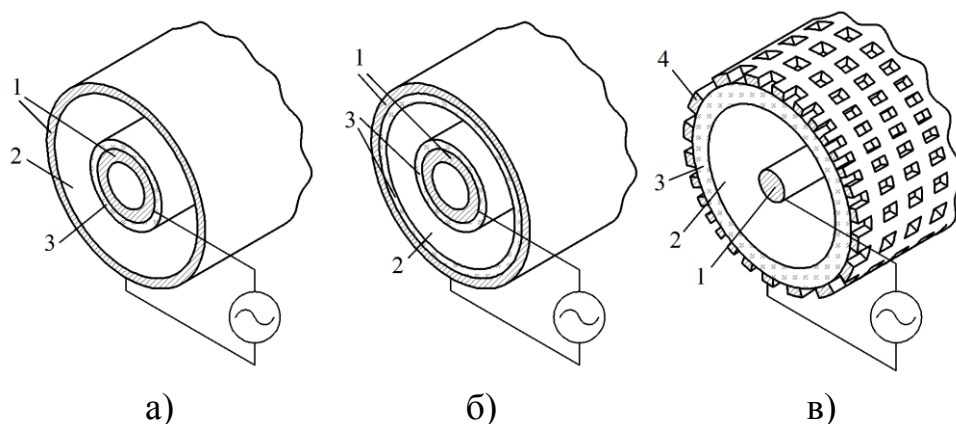


1 – электрод, 2 – межэлектродный промежуток, 3 – диэлектрический барьер

Рисунок 1 – Конструкции разрядных систем с плоскопараллельными электродами

Наиболее широкое применение при производстве озона получили конструкции разрядных систем с цилиндрическими электродами. Также данные конструкции используются в эксимерных лампах с применением внешних сетчатых электродов (рисунок 2 в). Прозрачность сетки при

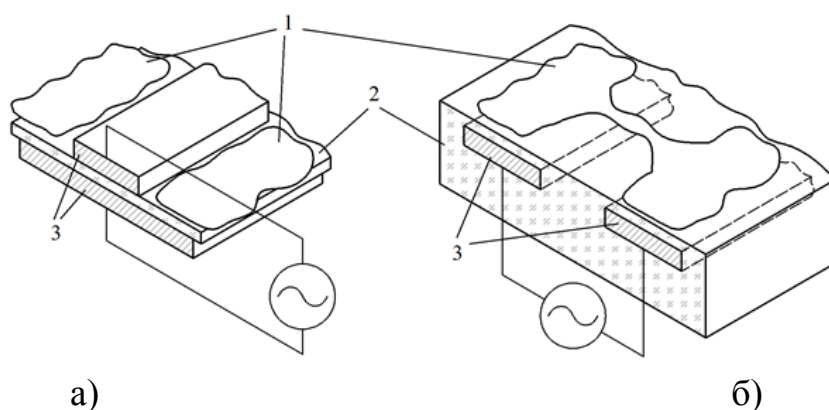
изготовлении ее из проволоки диаметром около 0,1 мм может достигать примерно 90%. Так же существуют многобарьерные эксимерные излучатели с несколькими газовыми промежутками, что позволяет возбуждать различные газовые смеси.



1 – электрод, 2 – межэлектродный промежуток, 3 – диэлектрический барьер, 4 – сетчатый электрод

Рисунок 2 – Конструкции разрядных систем с коаксиальными цилиндрическими электродами

Поверхностный (скользящий) и копланарный разряд развиваются на поверхности диэлектриков, так как газового промежутка для них нет. Особенностью копланарного разряда является то, что оба электрода залегают на небольшой глубине внутри диэлектрического слоя. Эти типы разрядов показаны на рисунке 3.



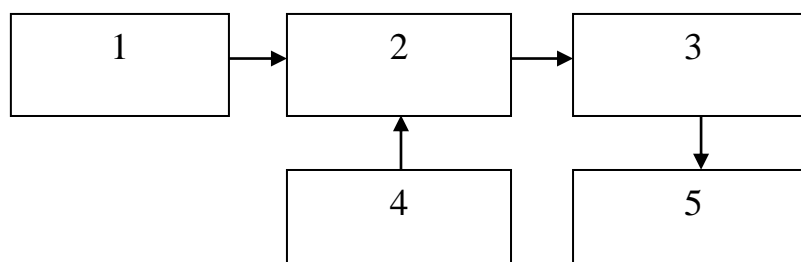
1 – область возникновения разряда, 2 – диэлектрический барьер, 3 – электрод

Рисунок 3 – Конструкции разрядных систем для возбуждения поверхностного (а) и копланарного (б) разряда

При расположении верхнего электрода (см. рисунок 2 а) непосредственно на поверхности диэлектрика наблюдается развитие поверхностного разряда. Последняя конфигурация (см. рисунок 2 б) также характеризуется развитием разряда по поверхности диэлектрика и состоит из одной или нескольких пар параллельных электродов, встроенных в толщу диэлектрика около поверхности.

В третьей главе приведены различные методики проведения экспериментов. Описан состав исследовательского стенда, конструкция и работа газоразрядной системы барьерного типа.

Для исследования концентрации активных плазменных частиц в послесвечении разряда барьерного типа при атмосферном давлении был собран исследовательский стенд, структурная схема которого показана на рисунке 4. Исследования проводились в воздушной среде.



1 – высоковольтный регулируемый источник питания; 2 – электроразрядная система; 3 – диэлектрическая трубка; 4 – штатив; 5 – аэроионометр АИМ-1

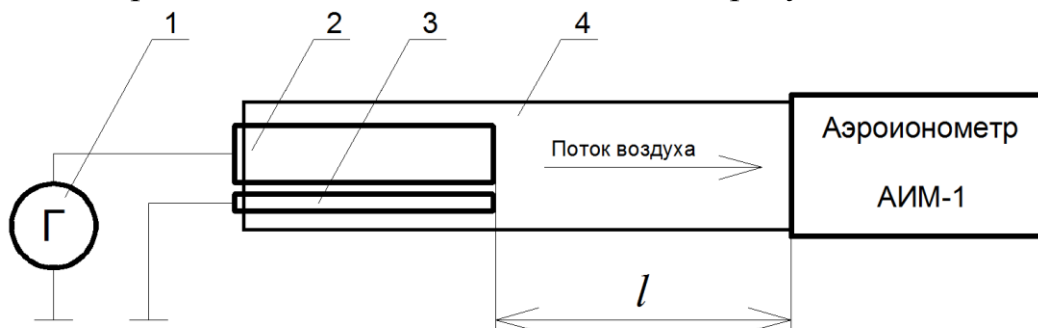
Рисунок 4 – Структурная схема исследовательского стенда

Во время измерения концентрации заряженных частиц разрядный и заземлённый электроды были закреплены на диэлектрическом основании, закреплённом на штативе. Разрядная система располагалась в диэлектрической трубке, в торце которой размещался аэроионометр АИМ-1. Изменяемым параметром являлось расстояние от аэроионометра до разрядной системы. Измерения проводились на расстояниях $l=5, 10, 15, 20, 25$ сантиметров от разрядной системы.

Аэроионометр АИМ-1 предназначен для измерения приведенных концентраций легких аэроионов одновременно обеих полярностей и полярных электрических проводимостей воздуха закрытых помещений в условиях как природной, так и искусственной аэроионизации. Поток воздуха, обеспечиваемый внутренним вентилятором аэроионометра, составляет 2 л/с.

С шагом приблизительно в одну секунду аэроинометр поочерёдно замеряет концентрацию как отрицательно, так и положительно заряженных частиц. Измерение проводилось в единицах 100 эл.зар./см^3 , что приблизительно равно 100 аэроионам в кубическом сантиметре.

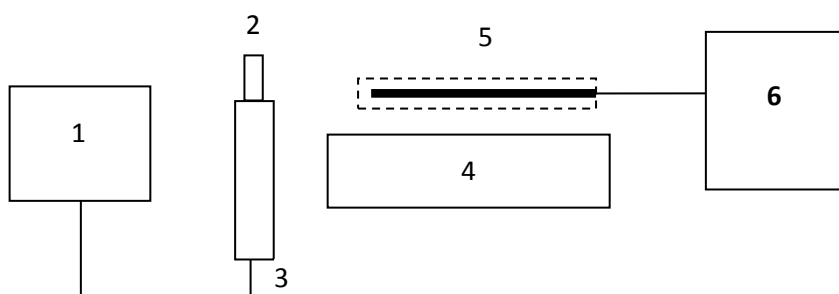
Схема проведения исследований показана на рисунке 5.



1 – высоковольтный регулируемый источник питания; 2 – разрядный электрод; 3 – заземлённый электрод; 4 – диэлектрическая трубка

Рисунок 5 – Схема проведения исследования

Схема проведения электрофизических экспериментов приведена на рисунке 6. Питание барьерного разряда производилось от источника высоковольтных импульсов амплитудой 30 кВ и частотой следования 100 Гц. Среднее значение тока, протекающего через разряд, составляло 0,1 мА, вкладываемая в разряд мощность – 2 Вт. Удельная мощность составляла 0,3 Вт/см².

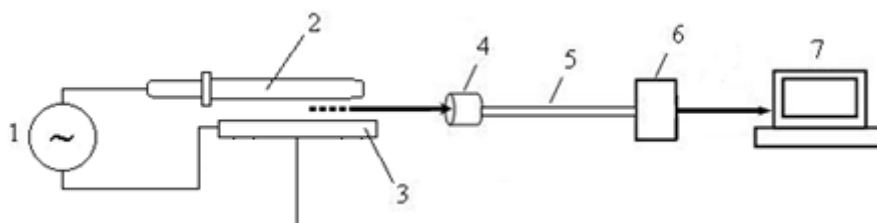


1 – осциллограф С8-13; 2 – цилиндрический измерительный зонд; 3 – осциллографический зонд; 4 – заземлённый электрод; 5 – высоковольтный изолированный электрод; 6 – генератор высоковольтных импульсов

Рисунок 6 – Схема проведения электрофизических экспериментов на установке с барьерным разрядом

Контроль параметров плазмы, позволяющих оценить локальные значения температуры в различных зонах плазменного образования, осуществляли методами оптической эмиссионной спектроскопии.

Схема разрядной системы барьерного типа атмосферного давления и диагностического оптико-спектроскопического блока приведена на рисунке 7.



1 – высоковольтный импульсный блок питания, 2 – разрядный электрод, 3 – заземленный электрод, 4 – микрообъектив, 5 – световод, 6 – спектрометр, 7 – ноутбук

Рисунок 7 – Схема проведения оптико-спектроскопических экспериментов

Регистрацию спектров излучения плазмы барьерного разряда проводили с использованием автоматизированного спектрометрического комплекса (АСК). В качестве спектрального блока использован светосильный монохроматор серии MS 3504 («СОЛАР-ТИИ», Беларусь), имеющий фокусное расстояние 350 мм и относительное отверстие 1/3,8 и оснащенный 4-х позиционной турелью для автоматической смены дифракционных решеток, что позволяет легко адаптировать прибор к конкретным задачам эксперимента.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования электрофизических и оптических характеристик разряда барьерного типа, представлены результаты данных исследований.

Диагностика плазмы, используемой в технологическом процессе для обработки различных материалов, необходима для определения оптимальных режимов ее воздействия на материалы, а также с целью оперативного контроля изменения состава плазмы вследствие поступления в плазменную среду продуктов деструкции материала, участвующих в последующих плазмохимических реакциях. В частности, при обработке термолabileльных материалов, таких как композиты на основе биополимеров, необходимо контролировать термодинамические параметры плазмы, чтобы исключить возможность термического нагрева образца и последующей его деструкции.

Для диагностики низкотемпературной неравновесной плазмы используются оптико-спектроскопические, зондовые, лазерные методы,

СВЧ-диагностика. Наиболее приемлемыми являются методы эмиссионной спектроскопии, позволяющие контролировать состав и термодинамические параметры плазмы в процессе обработки материалов, без внесения каких-либо возмущений в плазменный объем.

Результаты снятия электрических характеристик представлены на рисунке 8.

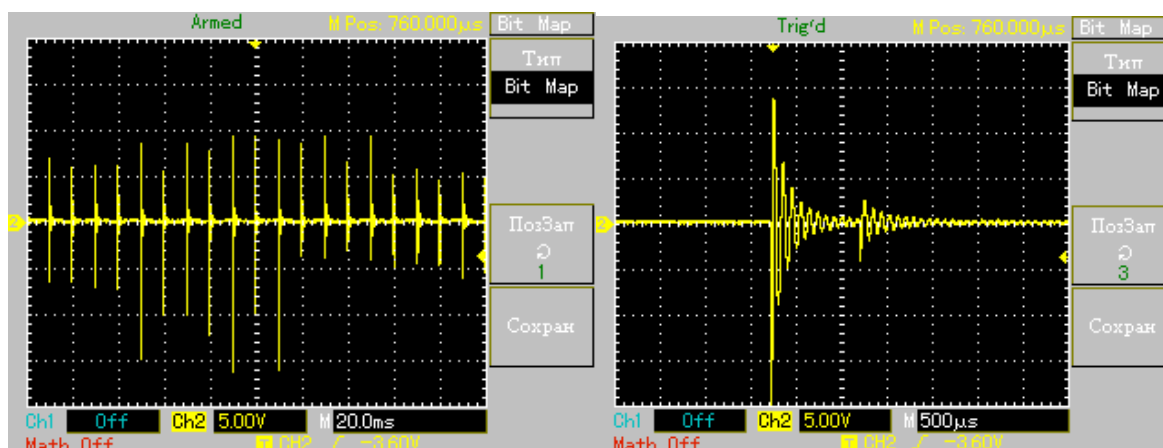


Рисунок 8 – Электрические характеристики барьерного разряда

Спектры излучения плазмы барьерного разряда в воздухе в области 250 – 1100 нм были представлены молекулярными полосами первой (1+) и второй (2+) положительных систем N_2 . Значение газокинетической температуры плазмы T_g составило порядка 390 К. Спектр излучения плазмы барьерного разряда представлены на рисунке 9.

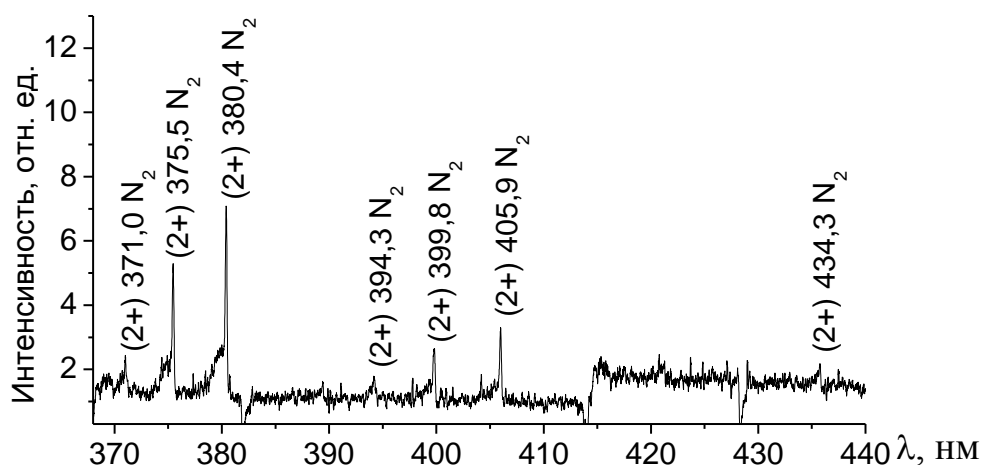


Рисунок 9 – Спектр излучения плазмы барьерного разряда в воздухе

Диагностика плазмы барьерного разряда осуществлялась без временного разрешения, по усредненным по времени эмиссионным спектрам, содержащим интегральную информацию о плазменном образовании в направлении наблюдения.

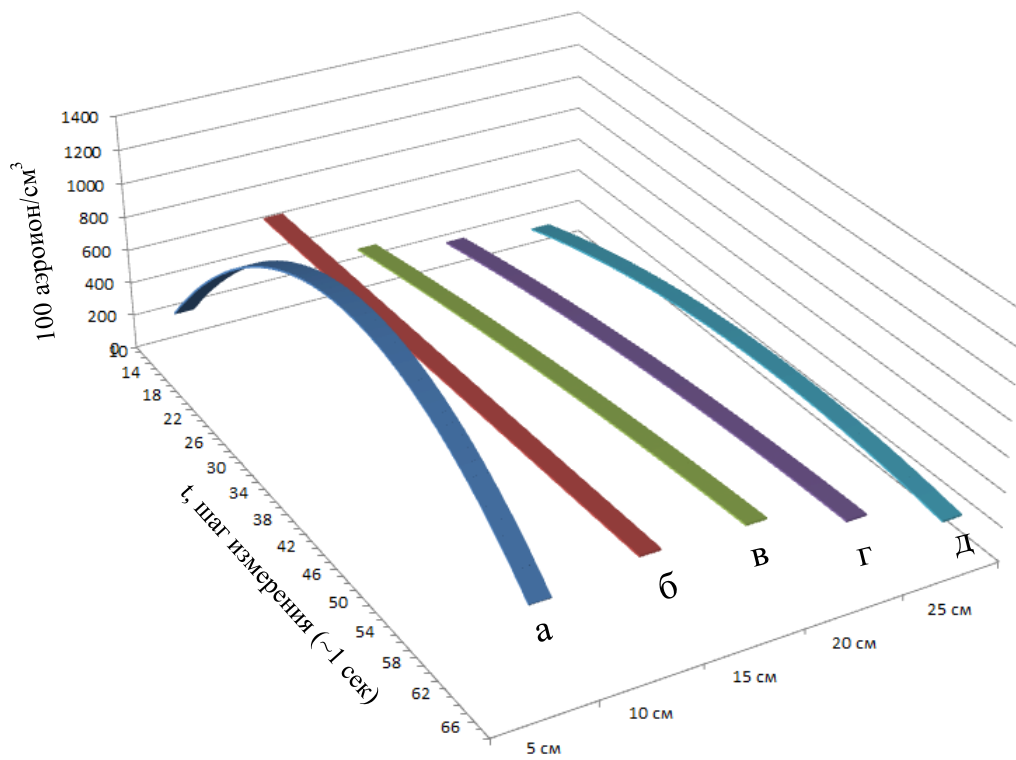
В пятой главе описаны экспериментальные исследования измерения концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц разряда барьерного типа атмосферного давления на различном расстоянии от плазмообразующей зоны. Получены экспериментальные данные, представленные на рисунке 11.

Как видно из представленных данных изменения концентраций отрицательно и положительно заряженных аэроионов имеют сложный характер. При этом видно, что снижение концентрации положительно заряженных аэроионов в зависимости от расстояния до разрядной системы изменяется в большей степени, чем отрицательно заряженных аэроионов.

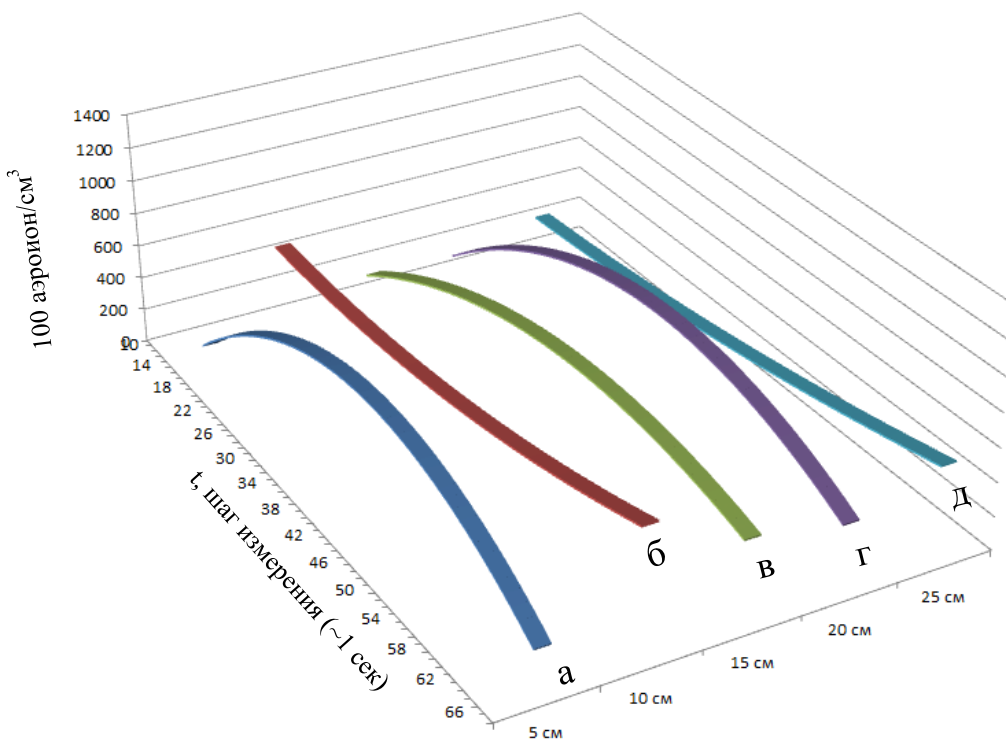
В шестой главе описаны экспериментальные исследования применения газоразрядной системы барьерного типа для деконтаминации биополимерных материалов, представлены результаты данных исследований.

Для изучения влияния плазменного воздействия на жизнеспособность грибов-колонизаторов бумаги проводили оценку выживаемости мицелия и спор грибов рода *Aspergillus* после обработки низкотемпературной газоразрядной плазмой в режимах при атмосферном давлении. В качестве модельных образцов полимеров использовали фильтровальную бумагу с нанесенными микроблоками агаризованной питательной среды, инокулированной спорами грибов рода *Aspergillus*, обладающих повышенной способностью выделять в окружающую среду органические кислоты (*A. niger*) и красно-оранжевые пигменты (*A. versicolor*).

На рисунке 12 представлены ИК спектры диффузного отражения образцов необработанной и обработанной в плазме барьерного разряда контаминированной грибными спорами бумаги.



1)



2)

На расстоянии а=5 см, б=10 см, в=15 см, г=20 см, д=25 см

Рисунок 11 – Зависимость концентрации от расстояния до разрядной системы для 1) положительно заряженных аэроионов; 2) отрицательно заряженных аэроионов

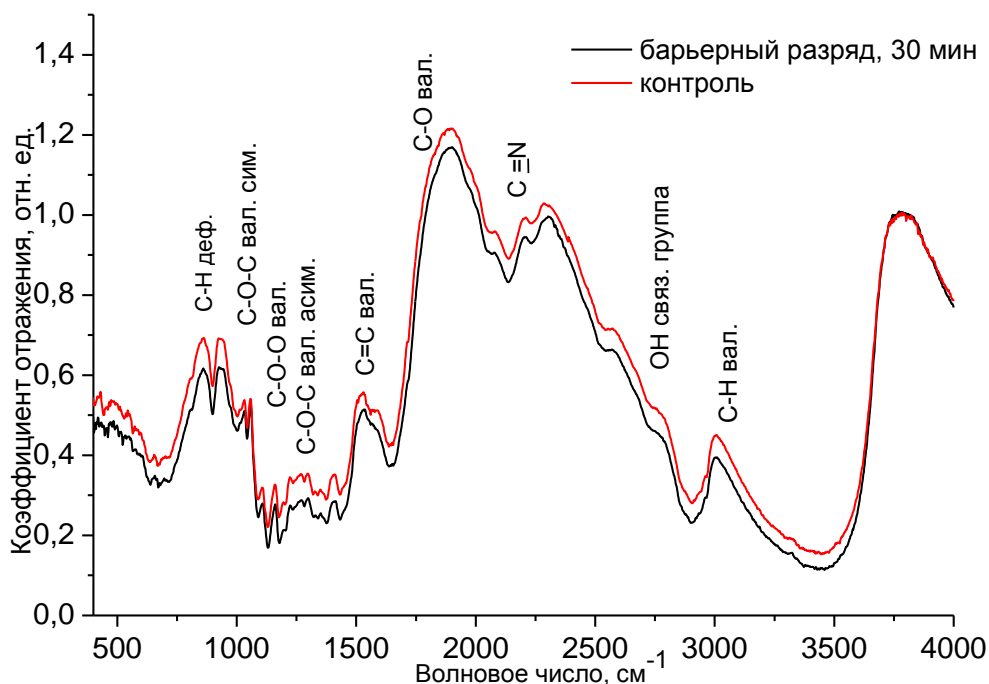


Рисунок 12 – ИК спектры диффузного отражения поверхности контаминированной грибными спорами бумаги до и после обработки плазмой барьерного разряда в течение 30 мин

Анализ результатов, полученных при использовании различных источников плазмы для деконтаминации биполимерных материалов, показал, что воздействие воздушной плазмы барьерного разряда при атмосферном давлении является наиболее эффективным способом плазменной очистки контаминированных грибными спорами биополимеров, что объясняется спецификой механизмов возбуждения и поддержания микроразрядов, в которых реализуются оптимальные условия для формирования высокой концентрации активных компонент (радикалов OH и атомов кислорода OI), обеспечивающих эффективное (до 90%) снижение количества жизнеспособных спор грибов рода *Aspergillus* (*A.niger* и *A.versicolor*), при этом локальный нагрев образца не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были изучены существующие типы барьерного разряда. Рассмотрены результаты основных направлений исследований в области плазмы низкотемпературного неравновесного разряда барьерного типа атмосферного давления.

Рассмотрены основные типы конструкций разрядных систем для возбуждения разряда барьерного типа.

Проведены исследования и получены экспериментальные данные электрических и оптических характеристик разряда барьерного типа.

Проведено исследование области послесвечения разряда барьерного типа в атмосфере воздуха. Получены и обработаны экспериментальные данные.

Определены термодинамические параметры используемой для деконтаминации материалов плазмы барьерного разрядов. Установлено, что в исследуемом диапазоне рабочих режимов значение газокинетической температуры плазмы барьерного разряда составило порядка 390 К.

Изучено влияние низкотемпературной плазмы на биологические свойства микроскопических грибов, выделенных из очагов плесневого поражения музейных предметов и произведений искусства на биополимерной основе. Показано, что жизнеспособность микромицетов в значительной степени зависит от длительности плазменного воздействия.

Результаты исследований опубликованы в виде тезисов докладов на научных конференциях.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1-А. Барахоев, А.Л. Экспериментальная установка для возбуждения разряда атмосферного давления барьерного типа / А.Л. Барахоев (научный руководитель С.В. Бордусов) // Физика конденсированного состояния (ФКС-XVI): тезисы докладов – Гродно, РБ, 2018 – С. 149-150.

2-А. Барахоев А.Л. Исследование применения разряда барьерного типа атмосферного давления для активации газообразной среды / А.Л. Барахоев (научный руководитель С.В. Бордусов) // 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2017 г. / БГУИР. – Минск. – 2017. – [в печати].