

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УДК 621.03.064.34

На правах рукописи

АКИЛЬДИНОВА АЙНУР КАЙРАТБЕКОВНА

Применение плазмы барьерного разряда для модификации функциональных диэлектрических и биологических материалов

6D072300 – Техническая физика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
Академик НАН РК,
д. ф.-м. н., профессор
Рамазанов Тлеккабул Сабитович

Зарубежный научный
консультант
Доктор наук, профессор
Керстен Хольгер

Республика Казахстан
Алматы, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗОРАЗРЯДОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ | 11 |
| 2 ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА | 25 |
| 2.1 Диагностика электрических свойств плазмы поверхностного диэлектрического разряда | 25 |
| 2.2 Исследование микроразрядной структуры диэлектрического барьерного разряда | 29 |
| 2.3 Диагностика оптических свойств плазмы поверхностного диэлектрического разряда | 35 |
| 2.4 Исследование скатывания частиц по поверхности диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда | 44 |
| 3 ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ | 54 |
| 3.1 Исследование биологического отклика зерен пшеницы на воздействие плазмы барьерного разряда | 54 |
| 3.2 Исследование обработанных плазмой барьерного разряда семян на заражение бактериями и микроскопическими грибами | 70 |
| 3.3 Исследование влияния плазмообработанной воды на рост листьев салата | 75 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 82 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 84 |

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДБР диэлектрический барьерный разряд
ДКПБР диэлектрический копланарный поверхностный барьерный разряд
КДБР копланарный диэлектрический барьерный разряд
ННП неравновесная низкотемпературная плазма
ОВП окислительно-восстановительный потенциал
ОДБР объемный диэлектрический барьерный разряд
ОМЗ органические микрозагрязнители
ПАВ плазмоактивированная вода
ПДБР поверхностный диэлектрический барьерный разряд
ПСАД плазменная струя атмосферного давления
ХПАД холодная плазма атмосферного давления
ФРЭЭ – функция распределения энергии электронов
R - соотношение интенсивностей линий азота
I- интенсивность вращательной структуры
k - константа скорости реакции
 τ_0 - время жизни возбужденных или ионизованных состояний молекул азота
T – параметр, зависящий от чувствительности фотодетектора
 τ_{air} - время жизни возбужденных или ионизованных состояний молекул азота в воздухе
 F_g – сила тяжести
 F_N – нормальная сила
 F_H – наклонная сила
 μ_H коэффициент статического трения
 μ_G – коэффициентом трения скольжения

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена исследованию газоразрядной плазмы барьерного разряда и ее применения для модификации функциональных диэлектрических и биологических материалов.

Актуальность темы.

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) – это разряд, который зажигается в узком газовом зазоре между плоскими или коаксиальными электродами, один из которых или оба покрыты диэлектриком. Особенностью данного вида разряда является то, что он генерируется при атмосферном давлении и в комнатных условиях, не нуждаясь в массивном вакуумном оборудовании. Это делает предпочтительным использование диэлектрического барьерного разряда для генерации плазмы атмосферного давления в таких сферах, где необходимо покрытие и обработка больших площадей и материалов. Также к достоинству диэлектрического барьерного разряда можно отнести получение низкотемпературной, так называемой "холодной" плазмы атмосферного давления. Плазма атмосферного давления, генерируемая диэлектрическим барьерным разрядом, широко исследуется в течение последних лет, что связано с ее применением во многих областях, например, в медицине [1], агропромышленности [2], для очищения воды [3], обработки поверхности различных материалов и в нанотехнологии [4].

Одним из видов разряда, генерирующих низкотемпературную плазму атмосферного давления, является диэлектрический барьерный разряд. В зависимости от конфигураций электродов различают несколько типов диэлектрического барьерного разряда: объемный диэлектрический барьерный разряд, поверхностный барьерный разряд. Существует также промежуточный тип ДБР, так называемый копланарный поверхностный диэлектрический барьерный разряд. На его основе используются установки, в которых на поверхности диэлектрика расположены металлические электроды в виде ряда параллельных полос. Основным преимуществом применения данного типа разряда является то, что плазма может генерироваться непосредственно в воздухе (нет необходимости в дополнительных рабочих газах) и покрывать очень большие объемы. Низкотемпературная плазма атмосферного давления вызывает большой интерес тем, что не требует специального громоздкого вакуумного оборудования и проста в получении.

Технологическое применение диэлектрического барьерного разряда является весьма обширным. Особенно можно выделить применение данного вида разряда в нанотехнологии, медицине и агропромышленности, что связано с возможностью обработки термочувствительных образцов, таких как полимеры, наноматериалы и биологические организмы.

Развитие агропромышленности в мире связано с новыми технологиями, необходимыми для выращивания и хранения сельскохозяйственных культур. Как известно, защита от болезней и вредителей, стимуляция роста семян - важная часть технологии выращивания агрокультур. Предпосевная обработка

семян - один из важнейших элементов технологии выращивания агрокультур, позволяющий повышать их всхожесть и защищать от вредителей. Кроме того, предпосевная обработка семян предупреждает появление и распространение ряда заболеваний в период роста и развития растений. В настоящее время возрастает роль физических методов предпосевной обработки семян, что обусловлено острой необходимостью получения экологически безопасной продукции и снижения пестицидной нагрузки.

Одним из перспективных физических методов предпосевной обработки семян является обработка низкотемпературной плазмой атмосферного давления. Плазменная обработка является альтернативой химической предпосевной обработке семян и обеспечивает экологически чистый метод устранения вредителей семян. Для обработки семян используется широкий спектр источников плазмы, таких как радиочастотные разряды [5], объемный диэлектрический барьерный разряд (ОДБД) [6,7], диэлектрический копланарный поверхностный барьерный разряд (ДКПБР) [8,9] и тд. На сегодняшний день из многочисленных видов физических методов предпосевной обработки семян ряд ученых выделяет обработку семян агрокультур плазмой диэлектрического барьерного разряда, так как данный тип разряда генерируется при атмосферном давлении, обладает высокой биологической активностью плазмы и имеет газокинетическую температуру около 300 К, что дает возможность исключить термальный эффект при обработке плазмой данного разряда семян агрокультур. В данном случае, не ионизирующее излучение низкой энергии и многочисленные реактивные частицы, в том числе активные формы кислорода и азота, генерируемые плазмой, могут быть использованы, чтобы вызвать желательные изменения в широком спектре развития физиологических процессов в растениях, повышение устойчивости семян к стрессу и болезням, изменение структуры семенного слоя [10], повышающее проницаемость семенного слоя и стимулирующее прорастание семян [11].

Согласно исследованиям ряда ученых плазма диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда может влиять на всхожесть семян агрокультур следующим образом: обеззараживание семян путем дезактивации вредоносных микроорганизмов и бактерий, что может значительно улучшить качество посева [12], внесение изменений в структуру поверхности семян, повышение гидрофильности, тем самым способствовать поглощению воды семенем [13]; изменение химического состава обработанных образцов путем внедрения радикалов [10, с. 240; 14]; стимуляция роста семян за счет выработки ферментативных антиоксидантов, необходимых для устойчивости в различных стрессовых условиях. Растительные организмы вырабатывают особые вещества, называемые ферментами или энзимами. Эти вещества обладают способностью вызывать и ускорять химические реакции, происходящие в живых организмах. Учеными исследуется один из видов ферментов, именуемый каталаза, так как он расщепляет перекиси с образованием молекулярного кислорода, то есть, разлагает вредные для

организма перекиси, тем самым защищая организм от внешних расстройств [14, с. 013525]. Также существует несколько видов ферментов, катализирующих реакции гидролиза, иначе гидролазы. К ним относится фермент альфа-амилаза, под действием которого происходит гидролиз крахмала с образованием декстринов и мальтозы, что влияет на дальнейший рост растений [11, с. 75].

Идея данной работы заключается в исследовании плазмы диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении применительно к технологии модификации диэлектрических и биологических материалов, путем изучения динамики макрочастиц, биологического отклика образцов на воздействие плазмы, изучения дезинфицирующих свойств и влияния на смачиваемость зерен.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ (НИР): «Разработка научно-технологических основ повышения роста растений и урожайности зерновых культур с помощью обработки холодной плазмой атмосферного давления» 2018-2020 гг., шифр ИРН АР05134280, «Исследование свойств и влияния холодной плазмы атмосферного давления на поверхности материалов» 2015-2017 гг., шифр 3220/ГФ4.

Цель работы – исследование свойств плазмы барьерного разряда применительно к технологии предпосевной обработки семян зерновых культур и технологии обработки проточной воды для различных приложений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

– изучить электрические и оптические свойства, микрозарядную структуру плазмы барьерного разряда; изучить динамику и взаимодействие отдельных сферических макрочастиц, функциональных диэлектрических и биологических материалов с плазмой поверхностного барьерного разряда;

– исследовать влияние плазмы барьерного разряда на биологические материалы, в частности на посевные качества, активность гидролизного фермента альфа-амилазы зерен пшеницы и ее применение в технологии предпосевной обработки семян;

– исследовать влияние обработки плазмой барьерного разряда на заражение бактериями и микроскопическими грибами семян пшеницы; исследовать воздействие плазмы атмосферного давления на характеристики проточной воды.

Объектами исследования являются плазма поверхностного барьерного разряда при атмосферном давлении и функциональные диэлектрические, биологические материалы.

Предмет исследования – статическая и динамическая вольт-амперные характеристики диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда, эмиссионные спектры разряда, структура ДКПБР, влияние обработки плазмой атмосферного давления на динамику макрочастиц функциональных диэлектрических материалов, влияние на биологические материалы, в

частности на семена и их прорастание, биохимический состав и на дезинфекцию поверхности семян.

Методы исследования. При решении задач, необходимых для достижения поставленной цели, использовались следующие методы: методы оптической диагностики плазмы, такие как оптико-эмиссионная спектроскопия, методы диагностики электрических характеристик разряда, методы диагностики поверхностных характеристик образцов сельскохозяйственных культур, в том числе электронная микроскопия, измерение смачиваемости образцов путем измерения контактного угла; методы измерения процента прорастания, параметров роста, метод измерения постоянной массы путем использования аналитического баланса; методы анализа биохимических свойств образцов сельскохозяйственных культур.

Новизна работы. Новизна и оригинальность работы заключается в том, что в ней впервые

- изучено взаимодействие отдельных сферических макрочастиц различных функциональных диэлектрических материалов с микрозарядными каналами поверхностного разряда и их динамика в процессе перемещения частиц по поверхности разрядной ячейки, предположено наличие электрогидродинамического эффекта, который может вызывать эффективный перенос долгоживущих реактивных форм кислорода и азота (RONS), что приводит к разрушению поверхностных тонких слоев материалов;

- исследовано влияние газоразрядной плазмы атмосферного давления на биологические материалы, в частности на активность фермента альфа-амилазы семян пшеницы на ранней стадии прорастания и проанализирована связь между временем обработки плазмой, активностью альфа амилазы и биометрическими параметрами проростков, применительно к технологии предпосевной обработки; показана связь между улучшением биометрических параметров проростков за счет биохимических изменений в семенах из-за воздействия активных форм азота и кислорода плазмы.

- продемонстрировано, что оптимальное время обработки плазмой для максимальной всхожести семян не коррелирует с необходимым временем обработки для полного уничтожения патогенных микроорганизмов на их поверхности.

Научно-практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе результаты представляют ценность для развития физики низкотемпературной плазмы и использования низкотемпературной плазмы атмосферного давления в агропромышленности. Полученные результаты могут быть полезны для обработки, очистки и модификации поверхности биологических материалов, обработки и улучшения свойств сельскохозяйственных культур. Результаты по исследованию взаимодействия сферических макрочастиц и плазмы поверхностного разряда могут быть полезны не только с фундаментальной точки зрения для определения механизмов зарядки и действия электрических и гравитационных сил в плазме атмосферного давления, но и с точки зрения практического применения для

диагностики свойств плазмы, обработки дисперсных и порошкообразных материалов с помощью диэлектрических барьерных разрядов. Результаты по изучению биохимического отклика зерна являются очень ценными для дальнейшего глубокого понимания процессов, происходящих при взаимодействии холодной плазмы атмосферного давления и семян сельскохозяйственных культур, оптимизации и улучшения технологии предпосевной обработки семян. Данные, полученные в рамках исследования обработки проточной воды плазмой атмосферного давления, будут полезны для масштабирования технологии плазменной активации воды, применения в развитии источников натуральных удобрений и стимуляторов роста растений, применения плазмоактивированных сред на водной основе в плазменной медицине и утилизации сточных вод, загрязненных особо стойкими ядовитыми веществами и химическими загрязнителями.

Значимость полученных результатов подтверждается публикациями в международных рецензируемых изданиях и участием на регулярных международных конференциях, а также постоянным интересом к проводимым исследованиям со стороны международных академических кругов.

Положения, выносимые на защиту:

1. С включением плазмы барьерного разряда ускорение перемещения макрочастиц вдоль наклонной поверхности установки при мощности 260 Вт снизилось при угле наклона 5° на 36-47%, 10° на 13-30%, 15° на 2-6%, 20° на 3-9% в зависимости от материала макрочастиц.

2. Обработка семян пшеницы плазмой барьерного разряда в течение 5-15 с при мощности 260 Вт приводит к увеличению всхожести семян на 20% за счет повышения активности гидролизного фермента альфа - амилаза до $1,0 \text{ мМЕ} \cdot \text{мг}^{-1}$ белка из-за активного воздействия реактивных форм кислорода и азота.

3. Воздействие плазмой барьерного разряда при мощности 260 Вт на семена пшеницы длительностью до 300 с увеличивает смачиваемость поверхности зерен и уменьшает количество патогенных грибов и бактерий.

Личный вклад автора заключается в том, что значительный объем выполненных работ, в том числе разработка, сборка, наладка и модернизация экспериментальных установок, подбор метода исследования, проведение экспериментов и анализ полученных данных выполнены автором самостоятельно. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

В диссертационной работе использовались известные и апробированные экспериментальные методы, такие как методы исследования электрических свойств плазмы (осциллографирование тока и напряжения), оптические методы диагностики (оптико-эмиссионная спектроскопия, высокоскоростная фотосъемка). Также достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором и в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в

сфере образования и науки МОН РК, и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Апробация работы и публикации. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

Статьи с импакт-фактором по базе данных Thomson Reuters или в изданиях, входящих в международную научную базу данных Scopus:

– E. A. Usenov, Yu. S. Akishev, A. V. Petryakov, T. S. Ramazanov, M. T. Gabdullin, A. Ashirbek, and A. K. Akil'dinova The Memory Effect of Microdischarges in the Barrier Discharge in Airflow // Plasma Physics Reports. – 2020. – Vol. 46;

– Е. А. Усенов, Ю. С. Акишев, А. В. Петряков, Т. С. Рамазанов, М. Т. Габдуллин, А. Аширбек, А. К. Акильдинова Эффект «памяти» микрозарядов барьерного разряда в потоке воздуха // Прикладная физика. – 2019. – № 5;

–Y. A. Ussenov , Ainur Akildinova , Bisenbaev Amangeldy Kuanbaevich, Kistaubaeva Aida Serikovna, Maratbek Gabdullin, Merlan Dosbolayev , Talgat Daniyarov, and Tlekkabul Ramazanov The Effect of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Wheat Seeds on Germination Parameters and - Amylase Enzyme Activity // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2022. – Vol. 50.

Статьи в изданиях, рекомендуемых ККСОН образования и науки МОН РК:

– Акильдинова А.К., Усенов Е.А., Пазыл А.С., Габдуллин М.Т., Досболаев М.К., Рамазанов Т.С., Данияров Т.Т. Электрические и оптические свойства диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2018. – 2.

– Акильдинова А.К., Усенов Е.А., Бисенбаев А.К., Габдуллин М.Т., Досболаев М.К., Данияров Т.Т., Рамазанов Т.С. Влияние обработки плазмой ДКПБР на всхожесть семян пшеницы и активность фермента α -амилазы // Журнал Проблем Эволюции Открытых Систем. – 2019. – Т.1.

– А.А. Mutalip, Y.A. Ussenov, A.K. Akildinova, M.K. Dosbolayev, M.T. Gabdullin, T.S.Ramazanov. Determination of the reduced electric field in surface dielectric barrier discharge plasmas // Bulletin of the Karaganda University. "Physics" Series. – 2021.– Vol. 103.

Публикация в сборниках тезисов докладов:

– Акильдинова А.К., Усенов Е.А., Пазыл А.С., Габдуллин М.Т., Досболаев М.К., Рамазанов Т.С.. Исследование электрических и оптических свойств диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». Алматы.- 2018. С.243.

– Akildinova A.K., Ussenov Y.A., Pazyl A.S., Gabdullin M.T., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. and Kersten H., Electrical and Optical properties of a dielectric coplanar surface barrier discharge // Book of abstracts: Symposium on Plasma Physics and Technology. Prague, Czech Republic.- 2018. P. 78.

– Акильдинова А., Усенов Е. Исследование обработки семян пшеницы

плазмой DCSBD // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ», Алматы.- 2019. - С. 362.

– A. Akildinova A., Y. Ussenov, Bissenbaev A.K., Yerlanuly Ye., Gabdullin M.T., Dosbolayev M.K., Daniyarov T.T., Ramazanov T.S., The effect of DCSBD plasma treatment on wheat seed germination and α -amylase enzyme activity // 24 th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Sapporo.- 2019. - P. 19 - 20.

– Akildinova A., Ussenov Y., Bissenbaev A.K, Gabdullin M.T., Dosbolayev M.K., Daniyarov T.T., Ramazanov T.S. Investigation of treatment of wheat seed by plasma of dielectric coplanar surface barrier discharge // 24th International Symposium on Plasma Chemistry, Naples.- 2019. - P.1-3

– А. Акильдинова, Е. Усенов, А.К. Бисенбаев, М.Т. Габдуллин, М.К. Досболаев, Т.Т. Данияров, Т.С. Рамазанов Обработка семян агрокультур плазмой DCSBD // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». Алматы.- 2021.

– А. Акильдинова, Е. Усенов, М.Т. Габдуллин, М.К. Досболаев, Т.Т. Данияров, Т.С. Рамазанов Исследование влияния плазмообработанной воды на рост листьев салата// Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». Алматы.- 2022.

Инновационный патент РК:

– на полезную модель «Устройство для низкотемпературной плазменной обработки проточной воды при атмосферном давлении». Рег. номер заявки 2020/0734.2 от 11.08.2020.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ: 3 в журналах из Перечня ККСОН МОН РК для опубликования основных результатов диссертации на соискание ученой степени PhD и 3 статьи в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды); 7 работ в материалах Международных научных конференций и 1 инновационный патент.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 141 наименований, содержит 93 страницы основного компьютерного текста, включая 50 рисунков и 10 таблиц.

1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗОРАЗРЯДОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ

Плазма является четвертым агрегатным состоянием вещества после твердого, жидкого и газообразного состояний. Плазму можно определить как частично или полностью ионизированный квазинейтральный газ, состоящий из электронов, ионов, нейтральных частиц, молекул в основном или возбужденном состояниях, радикалов. В природе существует много разновидностей плазмы и более 99% вещества видимой Вселенной состоит из плазмы. Для генерации плазмы в лабораторных условиях используется нагрев, прикладывается высокое напряжение или вводятся электромагнитные волны в газ [1, с. 4828]. Плазма классифицируется как равновесная и неравновесная плазма в зависимости от относительной температуры электронов, ионов и нейтралов. В равновесной плазме компоненты плазмы (электроны и ионы) имеют одинаковую температуру, а в неравновесной плазме их температуры разные. Равновесная плазма общеизвестна как «тепловая (горячая) плазма», поскольку температуры нейтралов, ионов и электронов примерно одного порядка, и, таким образом, в такой плазме поддерживается тепловое равновесие. Неравновесная плазма известна как нетепловая (холодная) плазма, при этом, температура частиц варьируется: температура электронов (10 000 К) намного выше температуры тяжелых частиц (300-1000 К). Холодная плазма – слабоионизированный газ, который образовывается как при низком, так и при атмосферном давлении. Холодная плазма возбуждается и поддерживается электрически за счет применения радиочастотной и микроволновой мощностей, переменного и постоянного токов.

На сегодняшний день холодная плазма атмосферного давления (ХПАД) считается более предпочтительной по сравнению с плазмой низкого давления (<100 Па). Это связано с технологическими и экономическими преимуществами использования холодной плазмы атмосферного давления в промышленных целях. Во-первых, ХПАД способен генерировать стабильную плазму при атмосферном давлении, то есть без использования крупных вакуумных установок, требующих много пространства, энергии и времени, что исключает необходимость крупных капиталовложений и эксплуатационных затрат [1, с. 4828]. Более того, в простейших реакторах холодной плазмы атмосферного давления для генерации плазмы используется только окружающий воздух, подачи газа не требуется. Поэтому системы ХПАД просты в использовании, обладают хорошей масштабируемостью и промышленным применением. Еще одним преимуществом холодной плазмы атмосферного давления является ее низкая температура, что позволяет минимизировать тепловые нагрузки на поверхность обрабатываемых образцов. Холодная плазма атмосферного давления используется в пищевой промышленности, агрокультуре, медицине, нанотехнологии.

Существует несколько методов генерации холодной плазмы атмосферного давления в зависимости от геометрии разрядной ячейки и частоты, амплитуды

подаваемого напряжения: плазменная струя атмосферного давления (plasma jet), коронный разряд, скользящий дуговой разряд, диэлектрический барьерный разряд и др. Используются рабочие газы, такие как: воздух, кислород, азот, гелий, аргон и их смеси в различных концентрациях. Схемы методов генерации холодной плазмы атмосферного давления приведены на рисунке 1.

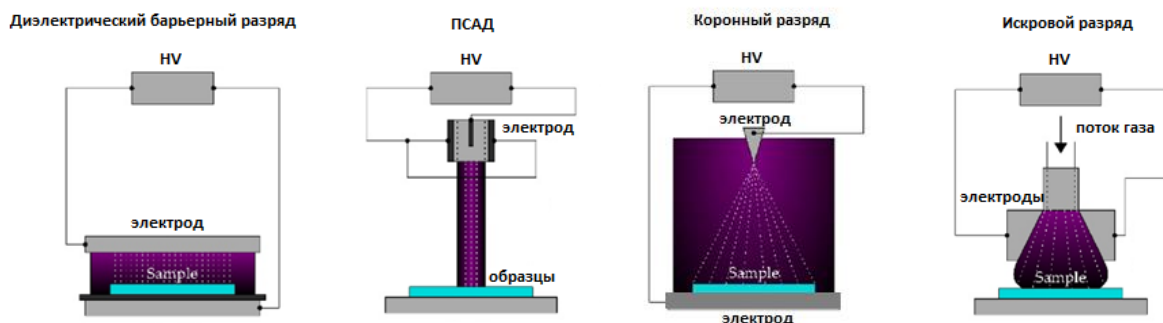


Рисунок 1 – Схемы методов генерации холодной плазмы атмосферного давления

Плазменная струя атмосферного давления (ПСАД) это тип газового разряда, который позволяет производить высокоскоростной поток высокореактивных химических веществ со слабым излучаемым светом. Установка плазменной струи атмосферного давления обычно состоит из двух цилиндрических электродов, где внутренний электрод подключен к высокочастотному или сверхвысокочастотному (СВЧ) источнику питания, вызывая ионизацию рабочего газа (в основном используются благородные газы, такие как гелий, аргон). В зависимости от конфигурации и используемых материалов, ПСАД можно разделить на одноэлектродные струи, бездиэлектрические электродные струи, струи диэлектрического барьерного разряда (ДБР) и т.д. Миниатюрные плазменные струи известны как плазменные ручки, плазменные горелки или плазменные иглы [15,16]. Основным элементом плазменных игл является электрод с заостренным концом внутри трубки. Подающий газ (чаще всего гелий) проходит через трубку и смешивается с воздухом на кончике иглы, где создается микроразряд [17]. Диаметр генерируемого свечения плазмы составляет несколько миллиметров [18].

Коронный разряд возникает при приложении высокого напряжения между двумя или более острыми электродами. Коронирующий электрод обычно представляет собой иглу или тонкую проволоку. В процессе ионизации вокруг этого активного электрода образуется корона. Короны - это очень слабые разряды с очень низкой плотностью электронов и ионов [19].

Плазменные реакторы со скользящим дуговым разрядом известны как источники горячей плазмы, однако при определенных условиях они могут также производить холодную плазму. Разряд формируется высоким напряжением в месте наименьшего расстояния между расходящимися электродами (~ в пределах миллиметров). Электроды помещаются в быстрый

поток газа, и разряд увеличивает свой объем и длину в направлении потока [20].

Из множества различных типов реакторов холодной плазмы атмосферного давления наиболее широко используется конфигурация диэлектрического барьерного разряда, что связано со способностью создавать стабильную плазму в молекулярных газах, таких как воздух. Диэлектрический барьерный разряд обычно состоит из двух металлических электродов, покрытых диэлектрическим материалом и разделенных разрядным промежутком.

Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки. диэлектрического барьерного разряда всегда упоминалась высокая степень масштабируемости, что делало ДБР идеальным выбором для лабораторных экспериментов при решении реальных масштабных задач. В зависимости от пространства, в котором генерируется разряд, можно выделить два основных типа диэлектрического барьерного разряда. В большинстве экспериментов два электрода разделены небольшим зазором, заполненным газом. В этом случае плазма генерируется, в основном, в объеме, определяемом газовым зазором и геометрией электрода. Этот тип разряда в литературе называется объемным диэлектрическим барьерным разрядом (ОДБР) [21,22] (рисунок 2).

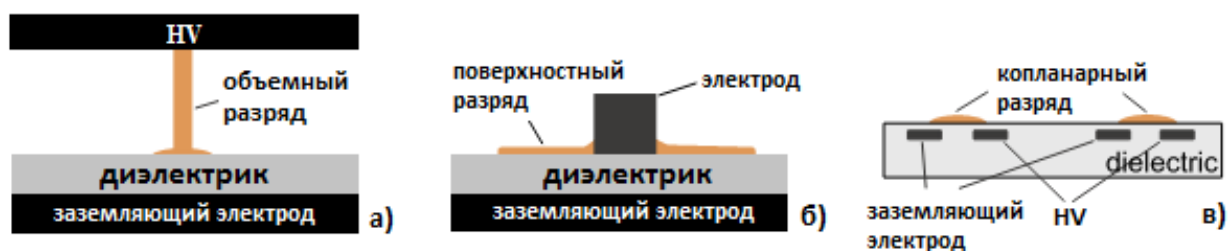


Рисунок 2 – Поперечные сечения основных конфигураций ДБР, а) объемный ДБР (ОДБР), б) поверхностный ДБР (ПДБР) и в) копланарный ДБР (КДБР)

Объемный диэлектрический барьерный разряд состоит из множества микрозарядов, которые развиваются в однородной фоновой напряженности поля. Их плотность является мерой активной мощности разряда и пропорциональна амплитуде напряжения. Микрозаряды имеют тенденцию всегда гореть в одних и тех же местах с приложенным напряжением, близким к значению пробоя (и относительно высокой рабочей частотой). Остаточные поверхностные заряды на диэлектрике и объемные заряды вызывают небольшое увеличение напряженности поля в этих местах после изменения полярности. С другой стороны, при высоком приложенном напряжении (и низкой рабочей частоте) микрозаряды изменяют свое положение на поверхности случайным образом из-за довольно однородного распределения остаточного заряда на диэлектрике. На положение микрозарядов также могут влиять заряженные и/или метастабильные частицы в разрядном промежутке [21, с. 2620; 22, с. 063520].

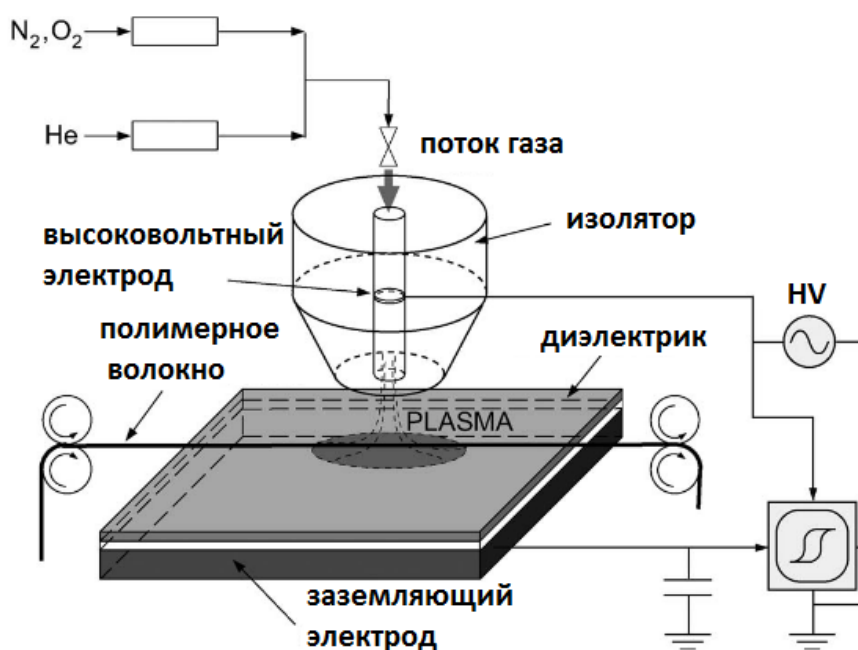
Если зазор между электродами заполнен твердым диэлектрическим материалом, плазма генерируется на поверхности диэлектрика, в результате чего образуется диэлектрический барьерный разряд, который в литературе называется поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом (ПДБР) или поверхностным микроразрядом [23]. В большинстве случаев этот разряд генерируется только на одной стороне диэлектрика, что ограничивает возбужденный объем и снижает эффективность разряда с точки зрения образования химически активных радикалов или с точки зрения разложения целевых молекул [24].

В данной работе изучается промежуточный тип диэлектрического барьерного разряда, называемый диэлектрическим копланарным поверхностным барьерным разрядом (ДКПБР), который генерируется при атмосферном давлении и может использоваться для обработки различных полимерных, сельскохозяйственных материалов, текстильных изделий и других термочувствительных материалов. Диэлектрический копланарный поверхностный барьерный разряд возникает между параллельно расположенными электродами, встроенными в диэлектрический слой. При малых межэлектродных зазорах (в диапазоне 100 мкм) в газовой области над электродами возникают высокие начальные напряженности поля, и разряд перекрывает эту область полностью. Установлено, что разряд имеет структуру в виде каналов, подобных микроразряду (например, в воздухе при атмосферном давлении). Диаметр канала составляет от 25 до 40% расстояния зазора в рассматриваемых условиях. В зависимости от амплитуды напряжения за половину периода могут появиться несколько каналов разряда [22, с. 063520]. Несмотря на большое количество опубликованных в последнее время работ по исследованию данного вида разряда, диэлектрический копланарный поверхностный барьерный разряд является все еще полностью не изученным типом диэлектрического барьерного разряда.

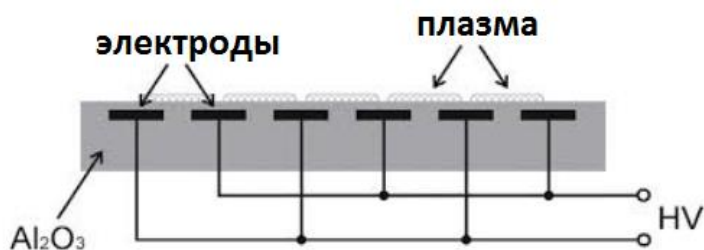
Технологическое применение диэлектрического барьерного разряда является весьма обширным. Особенно можно выделить применение данного вида разряда в нанотехнологии, медицине и агропромышленности, что связано с возможностью обработки термочувствительных образцов, таких как полимеры, наноматериалы и биологические организмы.

Создание поверхностей и интерфейсов, позволяющих контролировать взаимодействие с конкретной средой посредством определенного химического состава и ориентации определенных химических функциональных групп, является серьезной проблемой при разработке методов обработки поверхности. В этом отношении плазма представляет собой очень реактивную и уникальную среду при контакте с поверхностью полимерных материалов, из-за сложного вклада и большого разнообразия энергетических частиц. Большая часть исследований, связанных с модификацией поверхности с помощью разряда, проводилась в среде с холодной плазмой низкого давления, поскольку процессы вакуумной обработки обеспечивают в основном хороший контроль над газохимией и дают возможность использовать выбранные энергетические

частицы в процессе модификации поверхности. Тем не менее, в последние годы большое внимание уделяется производству и управлению холодной плазмой при атмосферном давлении, что дает определенные преимущества для модификации поверхности различных материалов. В этом отношении диэлектрические барьерные разряды (ДБР) являются удобными источниками генерации нетепловой плазмы при атмосферном давлении. Как уже было отмечено выше, ДБР обеспечивает короткое время обработки, работу при комнатной температуре, отличную гибкость в отношении его геометрической формы, рабочей газовой смеси, рабочих параметров и масштабирования до больших размеров. ДБР существует в нескольких конфигурациях, и в настоящее время эксплуатируется в многочисленных приложениях. На рисунке 3 представлены различные конфигурации диэлектрического барьерного разряда, использующиеся для обработки полимерных материалов.



а) экспериментальная установка ДБР при атмосферном давлении для обработки пленок и волокна

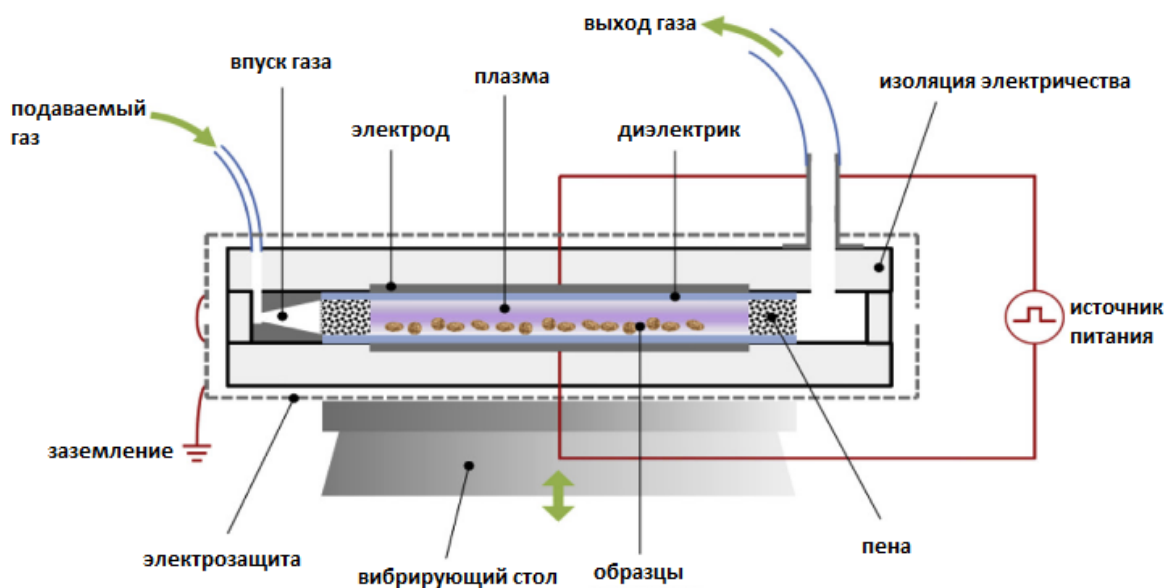


б) диэлектрический копланарный поверхностный барьерный разряд

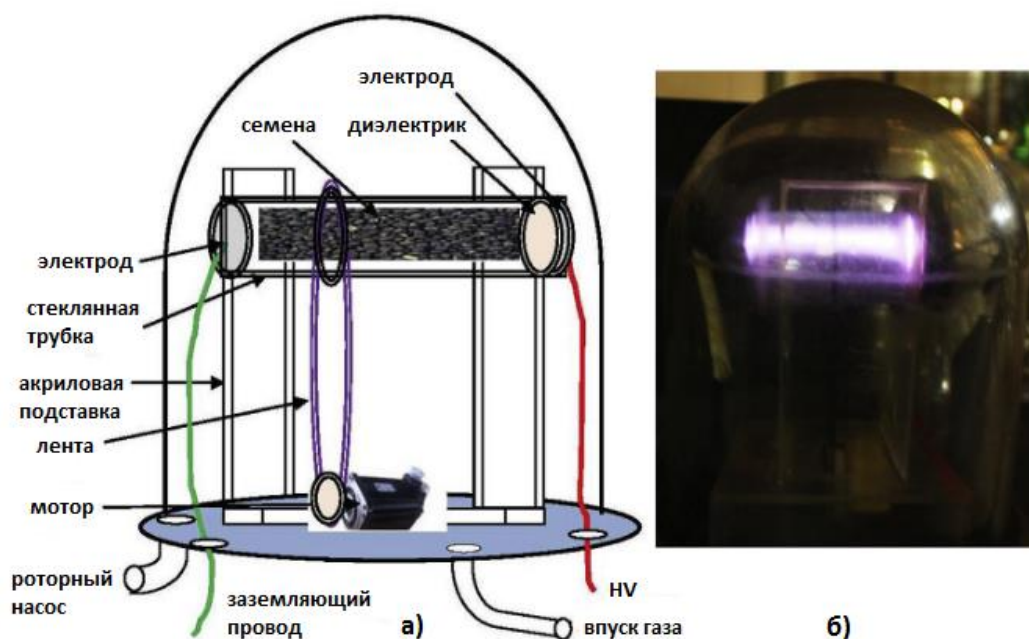
Рисунок 3 – Различные конфигурации диэлектрического барьерного разряда для обработки полимерных материалов

Также нетепловая плазма атмосферного давления предлагает уникальные возможности для обработки термочувствительных мишеней, таких как полимеры и биологические организмы, для обработки наноматериалов, используемых в медицине и агрокультуре [15, с. 5119; 25]. За последнее десятилетие количество опубликованных работ, посвященных использованию плазмы атмосферного давления в сельском хозяйстве, линейно выросло [26]. В этой области ученые наблюдали, что плазма может дезинфицировать пищевые продукты и обеззараживать семена растений, фрукты и овощи [27,28]. Несколько авторов сообщили об эффективном улучшении прорастания и роста сельскохозяйственных видов растений, таких как пшеница [29–32], кукуруза [30, с. 399], люпин [33], соевые бобы [36], [38], маш [36, с. 5922], редис [37], горох [38] и рис [37, с.3].

Исследование диэлектрического барьерного разряда широко освещается в научных статьях по обработке семян и растений. Благодаря своей простой и гибкой конструкции, ДБР можно легко адаптировать для обработки различных типов подложек. Большинство используемых реакторов ДБР имеют планарную конфигурацию (параллельные пластины), работающую при атмосферном давлении. Во многих исследованиях рассматривается разряд в воздухе. Чтобы избежать высоких напряжений из-за напряжения пробоя, необходимого для зажигания плазмы в таких условиях, необходимо либо уменьшить зазор, либо давление газа должно быть уменьшено. Другим аспектом является применение в системе дополнительных вращающихся или вибрирующих механических частей для обеспечения однородной обработки всех семян. Бутшер и соавторы [39] собрали реактор с параллельными пластинами на горизонтальном вибростоле (рисунок 4 (а)). Пиза и соавторы [40] механически перемещали семена во время обработки. Планарный реактор, используемый Биллахом и соавторами [41], имел вращающуюся систему, которая обеспечивала движение семян (рисунок 4 (б)), а Магурияну и соавторы [42] использовали высокую скорость потока газа (15 ст.л.м.) внутри реактора с коаксиальной конфигурацией.



а) реактор с параллельными пластинами на горизонтальном вибростоле [39]



б) планарный реактор с вращающейся системой [41]

Рисунок 4 – Различные конфигурации ДБР для обработки семян

Развитие агропромышленности в мире связано с новыми технологиями, необходимыми для выращивания и хранения сельскохозяйственных культур. Так как Казахстан является одной из передовых стран по экспорту пшеницы, улучшение предпосевных качеств семян является приоритетной задачей в сфере агропромышленности. Как известно, защита от болезней и вредителей, стимуляция роста семян - важная часть технологии выращивания агрокультур.

Предпосевная обработка семян - один из важнейших элементов технологии выращивания агрокультур, позволяющий повышать их всхожесть и защищать от вредителей. Кроме того, предпосевная обработка семян предотвращает появление и распространение ряда заболеваний в период роста и развития растений. На сегодняшний день из многочисленных видов физических методов предпосевной обработки семян ряд ученых выделяет обработку семян агрокультур плазмой диэлектрического барьерного разряда, потому что, как было сказано выше, данный тип разряда не требует массивного вакуумного оборудования, обладает высокой биологической активностью плазмы и имеет температуру около 300 К, что дает возможность исключить термальный эффект при обработке плазмой данного разряда семян агрокультур. В данном случае, не ионизирующее излучение низкого уровня и многочисленные реактивные частицы, в том числе активные формы кислорода и азота, генерируются плазмой. Они могут быть использованы, чтобы вызвать желательные изменения в спектре развития физиологических процессов в растениях, повышение устойчивости семян к стрессу и болезням, изменение структуры семенного слоя [43], повышающее проницаемость семенного слоя и стимулирующее прорастание семян [14, с. 013525].

Согласно исследованиям ряда ученых плазма диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда может влиять на всхожесть семян агрокультур следующим образом: обеззараживание семян путем дезактивации вредоносных микроорганизмов и бактерий, что может значительно улучшить качество посева [26, с. e1700073], внесение изменений в структуру поверхности семян, повышение гидрофильности, тем самым способствовать поглощению воды семенем [13, с. 13034], изменение химического состава обработанных образцов путем внедрения радикалов [43, с. 8], стимуляция роста семян за счет выработки ферментативных антиоксидантов, необходимых для устойчивости в различных стрессовых условиях. Растительные организмы вырабатывают особые вещества, называемые ферментами или энзимами. Эти вещества обладают способностью вызывать и ускорять химические реакции, происходящие в живых организмах. Учеными исследуется один из видов ферментов каталаза, так как он расщепляет перекиси с образованием молекулярного кислорода, то есть, разлагает вредные для организма перекиси, тем самым защищая организм от внешних расстройств [14, с. 013525]. Также существуют несколько видов ферментов, катализирующих реакции гидролиза, иначе гидролазы. К ним относится фермент альфа-амилаза, под действием которого происходит гидролиз крахмала с образованием декстринов и мальтозы, что влияет на дальнейший рост растений. Всхожесть и скорость прорастания семян растений зависят от многих факторов, таких как вода, кислород, температура и свет [44]. Кроме этого, показано, что физические факторы, такие как лазерное облучение [24, с. 1600255], магнитное поле [45], низкое давление [46], плазменная обработка [47,48], гамма-лучи, и УФ-излучение оказывают значительное действие на эффективность прорастания зерна. Однако полученные данные

противоречивы и механизм стимулирующего действия физических факторов на эффективность прорастания семян пшеницы исследован недостаточно подробно [11, с. 75].

Волин и др. [49] определили, что эффекты прорастания меняются в зависимости от различных условий для семян, обработанных плазмой. Менг и др. обнаружили, что обработки, в которых используются разные типы газов, оказывают различное влияние на рост семян из-за разной реакции на радиацию [50]. Замечено, что обработка плазмой увеличивает скорость роста многих типов семян, включая семена редиса [51], пшеницы, овса [52]. Чтобы получить оптимальную обработку с точки зрения влажного прорастания и роста, необходимо исследовать соответствующие мощность и время обработки. Исследования продемонстрировали значительное улучшение стрессоустойчивости, скорости водопоглощения [53] и повышение скорости прорастания семян [53, с. 785], обработанных плазмой, в неблагоприятных условиях засухи и солевой щелочи. Плазма может не только способствовать росту семян, увеличению их всхожести, но и стерилизовать поверхность семян, чтобы предотвратить заражение семян бактериями [54]. Бормашенко и др. [55] провели испытания на всхожесть семян сои, обработанных плазмой, показав явное увеличение водопоглощения и скорости прорастания семян в результате плазменной обработки. Сера и др. [56] показали, что семена трех сортов конопли (*fnola*, *biobrzeskie* и *caragnola*) по-разному реагировали на предварительную обработку холодной плазмой. Кроме того, технология холодной плазмы может применяться для обработки семян, сухофруктов и зерновых с целью усиления жизнеспособности, а также для стерилизации семян [27, с. 044012]. Эффекты плазменной обработки были продемонстрированы для многих типов семян и включают в себя улучшение потенциала прорастания, скорости прорастания, корней, засухоустойчивости, роста, урожайности и качества. Обработка плазмой семян может происходить с помощью множества процессов, включая реакции с химически активными частицами и ультрафиолетовым излучением плазмы [57]. Параметры обработки плазмой семян зависят от типа разряда и условий воздействия [57, с. 491; 58]. Также результат обработки плазмой семян зависит от типа обрабатываемого образца, поскольку реакция семян разных сортов на плазменную обработку отличается друг от друга. Даял и др. [59] предположили, что ионное травление является основной причиной плазменного сжатия зародышей, Сера и др. [60] отметили значительное влияние активных молекул, генерируемых плазмой, на вторичный метаболизм во время прорастания семян. Плазма содержит заряженные частицы, которые играют важную роль в повреждении внешней клеточной мембраны. Накопление заряда на поверхности клеточной мембраны создает электростатическую силу. Когда электростатическая сила достигает определенного уровня, клеточная мембрана может разорваться, что впоследствии может увеличить проницаемость клеточной мембраны, тем самым увеличивая проницаемость семенной оболочки. В таких условиях абсорбция воды и питательных веществ ускоряется, что способствует

прорастанию семян [61,62]. Хуанг и др. выявили, что в условиях стрессовой для образцов засухи разные виды плазменной обработки оказывали различное влияние на рост проростков пшеницы [63]. В частности, проницаемость плазматической мембраны и содержание малонового диальдегида были значительно снижены по сравнению с контролем, уменьшая или даже предотвращая повреждение мембраны перекисным окислением [64].

Еще одним перспективным направлением использования неравновесной плазмы атмосферного давления является обработка воды и различных жидких сред на водной основе. Данные объекты могут включать дистиллированную или обычную воду, сточные воды, воды для полива и/или различные физиологические и фармацевтические растворы. Несмотря на то, что обработка воды плазмой с целью придать ей различные "сверхъестественные" свойства уже давно известна и порой даже граничила с псевдонаукой, а также довольно скептически принималась научным сообществом, применение холодной плазмы атмосферного давления для биомедицины, уничтожения раковых клеток и для сельского хозяйства открыло новые горизонты и мотивацию для изучения воздействия плазмы на воду.

Чистая вода необходима экосистеме для поддержания жизни, а также социального и экономического развития [3, с. 290]. Однако по мере роста населения с каждым днем увеличивается антропогенное воздействие на окружающую среду [65,66]. В настоящее время сточные воды, образующиеся из таких источников, как промышленность, сельское хозяйство, дома и т. д., содержат значительное количество органических микрозагрязнителей (ОМЗ) и, таким образом, вызывают множество проблем, связанных с окружающей средой и здоровьем. Согласно нескольким исследованиям, различные ОМЗ, такие как фармацевтические препараты, пестициды, органические красители, часто обнаруживаются в сточных водах, поверхностных водах и даже в питьевой воде (рисунок 5).

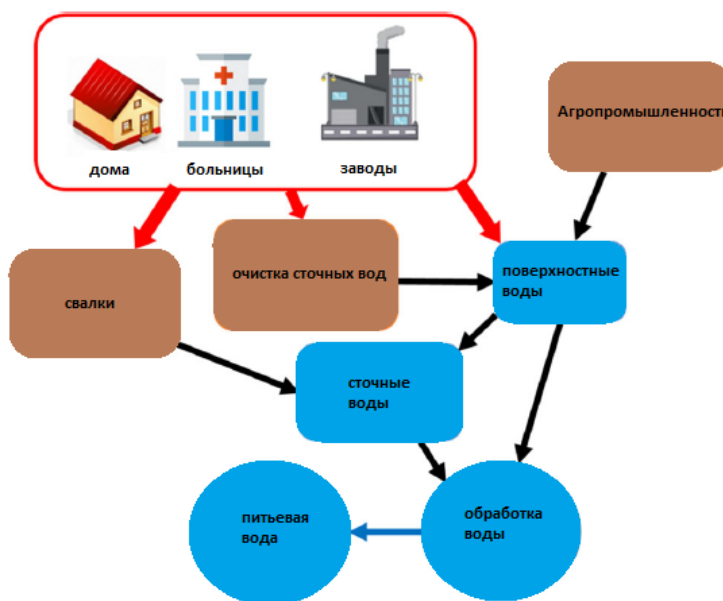


Рисунок 5 – Источники ОМЗ и их поток в окружающей среде [3, с. 291]

В настоящее время большой интерес вызывают методы окисления на основе холодной плазмы. Есть много работ, показывающих, что этот тип плазмы можно использовать для разложения различных токсичных ОМЗ в воде, таких как фармацевтические препараты, органические красители, пестициды [67,68]. Холодная плазма может образовывать многие активные формы кислорода (например, HO , $\text{O}\cdot$, $\text{HO}_2\cdot$, O_3 , H_2O_2 и т.д.). Реакционноспособные частицы, образующиеся в плазме, обладают высоким окислительным потенциалом, и они могут вступать в реакцию и устранять многие стабильные ОМЗ при низкой температуре, атмосферном давлении и без использования каких-либо опасных химических веществ. Например, генерируемые плазмой окислители $\text{HO}\cdot$, $\text{O}\cdot$, O_3 и H_2O_2 имеют окислительные потенциалы 2,86 В, 2,42 В, 2,07 В и 1,78 В соответственно. Все эти окислительные потенциалы выше, чем у хлора (1,36 В) [69], который иногда используется в качестве отбеливающего агента для уменьшения цвета промышленных сточных вод. Более того, очистка загрязненной воды с использованием хлора не является экологически чистым процессом [70]. Холодная плазма обеспечивает обильное образование высокореактивных частиц без добавления химических реагентов. Плазменная обработка не приводит к вторичному загрязнению и во время обработки создаются менее токсичные промежуточные продукты трансформации, которые являются биоразлагаемыми. Процессы плазменной дезактивации можно рассматривать как экологически чистую технологию. Но нужно знать, что отдельные виды могут сохраняться в очищенной воде и могут быть вредны для некоторых водных организмов [71]. Более того, систему холодной плазмы можно использовать отдельно или в сочетании с обычными методами очистки сточных вод [72].

В целом, установки холодной атмосферной плазмы, используемые для обработки жидкостей, можно разделить на три категории: разряд над поверхностью жидкости, разряд в пузырьках и прямой разряд внутри жидкости. Эти разряды исследованы многими учеными для изучения явления границы раздела плазма-жидкость. Схемы типичных установок показаны на рисунке 6, но во всех трех категориях существует множество геометрий электродов, используемых для получения плазмы в конкретных экспериментах [73,74].

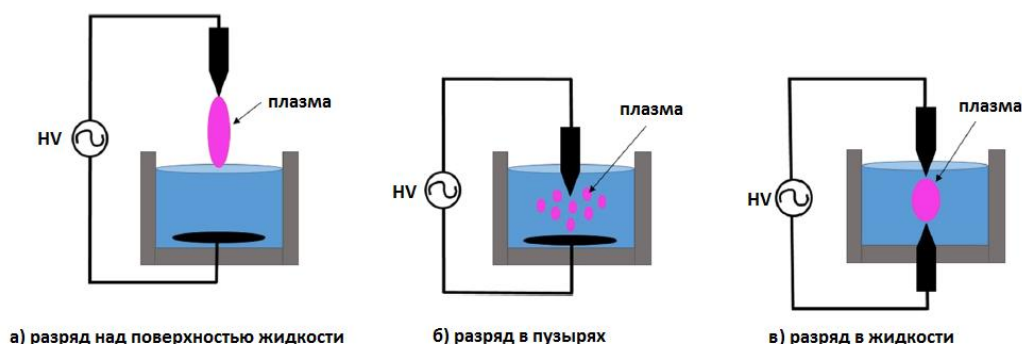


Рисунок 6 – Схемы экспериментальных установок, используемых для обработки жидкостей холодной плазмой

Когда холодная плазма вводится над поверхностью жидкости в присутствии окружающего воздуха, среда взаимодействия может быть разделена на три части: плазма в газовой фазе, граница раздела плазма-жидкость и объемная жидкая фаза, как схематически показано на рисунке 7 [75]. Реактивные виды, образующиеся в газовой фазе, могут диффундировать в жидкость или вызывать химические реакции в жидкости с образованием вторичных видов. Эти реактивные кислородные и азотные виды образованы в газообразной, межфазной и жидкой фазах, либо в плазме с добавлением инертного газа (например, аргона) или только в плазме, образующейся в окружающем воздухе над поверхностью жидкости поверхности [75, с. 053002; 76]. В случае разряда над поверхностью жидкости, скорость деградации ОМЗ внутри воды зависит от образования реакционноспособных видов вблизи границы раздела фаз [77].

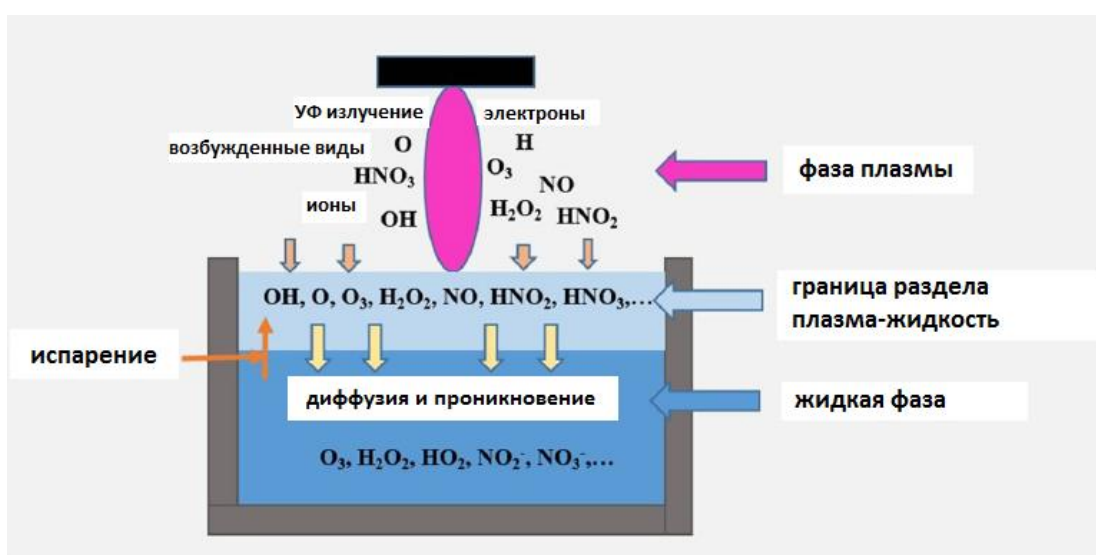


Рисунок 7 – Схематическое изображение генерируемых плазмой коротко- и долгоживущих видов в газовой фазе, на границе раздела плазма-жидкость и в объемной жидкости

Ежедневное интенсивное потребление фармацевтических препаратов привело к увеличению загрязнения воды [78]. Многие фармацевтические препараты обнаружены в окружающей среде как в низких, так и в высоких концентрациях [79]. Установлено, что некоторые фармацевтические препараты, попавшие в окружающую среду, представляют опасность как для водных видов, так и для здоровья человека [78, с. 1389]. Самым большим источником фармацевтических препаратов в окружающей среде являются стоки предприятий по очистке сточных вод и производству лекарств. Однако традиционные очистные сооружения не предназначены для снижения содержания некоторых фармацевтических препаратов [80]. Поэтому процессы усовершенствованного окисления на основе холодной плазмы были широко исследованы для удаления различных неразлагаемых фармацевтических соединений [81–83]. Хао и др. [84] использовали импульсный коаксиальный

ДБР для разложения тетрациклина в водном растворе. Балоул и др. [85] исследовали удаление парацетамола с помощью плазмы ДБР с конфигурацией реактора "игла-пластина" и различными рабочими газами (воздух, аргон и азот) с плазмой, создаваемой между кончиками электродов и поверхностью жидкости. Наваз и др. [86] исследовали разложение нитробензола в воде, используя параллельный пластинчатый реактор типа ДБР с различными рабочими газами, включая кислород, воздух и азот. В этой конфигурации реактивные виды образовывались в системе ДБР и распространялись в резервуар, содержащий нитробензол, поэтому плазменные стоки вступали в реакцию с целевыми молекулами. Магурян и др. [87] исследовали разложение пентоксифиллина с помощью импульсного коаксиального реактора ДБР с использованием кислорода в качестве рабочего газа. Результаты данных работ показывают положительное влияние обработки холодной плазмой атмосферного давления на удаление фармацевтических препаратов из воды.

Помимо этого, хорошо известно, что косвенное воздействие холодной плазмы на свежие продукты осуществляется через плазменно активированную воду [16, с. 1113]. В последнее время применение плазмоактивированной воды (ПАВ) приобретает все большее значение среди исследователей в качестве источника антимикробного раствора или дезинфицирующего раствора. Мытье сырых продуктов и свежих плодов водой или другими дезинфицирующими растворами для увеличения срока хранения является важным компонентом программ безопасности продуктов питания. Одним из таких дезинфицирующих растворов, используемых в настоящее время, является применение воды с высоким окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП). Особое преимущество использования ПАВ заключается в том, что он может заменить воду с высоким ОВП, получаемую при добавлении химикатов. Другим потенциальным применением ПАВ является улучшение прорастания семян и роста растений. Изменение свойств воды с помощью нетепловой плазмы и ее использование в агропромышленности может повлиять на процесс роста растений и повысить качество сельскохозяйственной продукции [88].

Среди нескольких причин потери урожая сельскохозяйственных культур важное место занимают снижение выживаемости семян из-за загрязнения, низкий процент всхожести и более длительное время прорастания [89]. Рост проростков во время прорастания включает два ключевых этапа: первичное удлинение клеток осевой части зародыша и одновременное или замедленное деление клеток в образовательных тканях [90]. В настоящее время использование ПАВ для повышения всхожести семян ограничено. Подводный электрический разряд фронтального типа использован для генерации ПАВ и обработки семян ржи в течение 5 мин. Всхожесть увеличена на 50% и количество проросших семян также увеличилось [91]. Эль-Мааруф-Буто и др. [92] заявили, что наряду с гормонами, радикалы ROS и NO участвуют в нескольких сигнальных путях, участвующих в прорастании семян. Исследования, связанные с прорастанием семян, показали, что ROS, включая супероксид, гидроксильный радикал, перекись водорода и атомарный кислород,

ответственны за прорастание семян [93]. Эти виды ROS производятся и высвобождаются митохондриями внутри клетки, которые считаются активными местами для производства новых клеток [94]. Образование дополнительных ROS, генерируемых в ПАВ, может еще больше повысить всхожесть семян. На основании имеющейся информации, становится ясно, что ПАВ является мощным и полезным средством для улучшения прорастания семян и стимулирования роста растений. Образование таких видов азота, как нитраты в ПАВ, в основном отвечает за рост растений, поскольку служит питательным веществом. ПАВ также обладает способностью ингибировать гормоны, ответственные за семена спячки и стимулировать рост. Общий эффект ПАВ показывает сходную активность с холодной плазмой и ее использование для дезинфекции, обеззараживания, усиления прорастания семян и роста растений.

В заключение литературного обзора можно сказать, что плазма барьерного разряда имеет широкое применение в нанотехнологии, медицине и агропромышленности. В данной работе особое внимание уделяется технологическому применению плазмы барьерного разряда для модификации функциональных диэлектрических и биологических материалов, что связано с приоритетностью этого направления для индустриально-инновационного развития страны. Несмотря на текущие достижения, механизмы влияния обработки плазмой ДКПБР функциональных диэлектрических и биологических материалов являются не до конца изученными и требуют дальнейшего исследования.

2 ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

На сегодняшний день применение плазмы атмосферного давления приобрело обширный характер, в связи с чем необходимо подробное изучение ее свойств, в частности, электрических и оптических. Оптическая диагностика позволяет качественно и количественно определить состав плазмы воздуха и выявить наличие активных молекул и атомов кислорода и азота. Данные активные молекулы имеют решающее влияние на поверхность и динамику частиц функциональных диэлектрических и биологических материалов. Полученные в данной главе результаты оптической и электрической диагностики, а также данные наблюдения за динамикой частиц диэлектрических материалов и микрозарядных каналов, будут использованы в следующей главе для интерпретации результатов обработки биологических материалов плазмой атмосферного давления.

2.1 Диагностика электрических свойств плазмы поверхностного диэлектрического разряда

Эксперименты проведены на установке диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда компании Roplass модели RPS400. RPS400 – полнофункциональный плазменный генератор атмосферного давления, где плазма загорается на поверхности установки площадью 8*20 см (рисунок 8).



Рисунок 8 – Общий вид экспериментальной установки (RPS400)

Для генерации плазмы система RPS400 использует диэлектрический поверхностный барьерный разряд. Диэлектрический поверхностный барьерный разряд можно использовать для обработки полимерных материалов, агрокультур, наноматериалов, биологических материалов и др.

Электродная система диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда собрана следующим образом: две системы серебряных ленточных электродов шириной 1,8 мм, толщиной 0,1 мм, длиной 230 мм встроены в 96%-ный оксид алюминия. Толщина керамического слоя между плазмой и электродами составляет 0,4 мм [11, с. 76]. Разряд включается синусоидальным высоковольтным напряжением (17 кГц, примерно 3 кВ от пика до пика), поставляемым с помощью плазменного источника питания HV.

Электрические параметры разряда измеряются с помощью пояса Роговского с подключением сопротивления номиналом 47 Ом и высоковольтным щупом Tektronix P6015 (1:1000). Сигналы регистрируются цифровым осциллографом Le Croy. Схематическое изображение измерительной системы ДКПБР показано на рисунке 9 [8, с. 61].

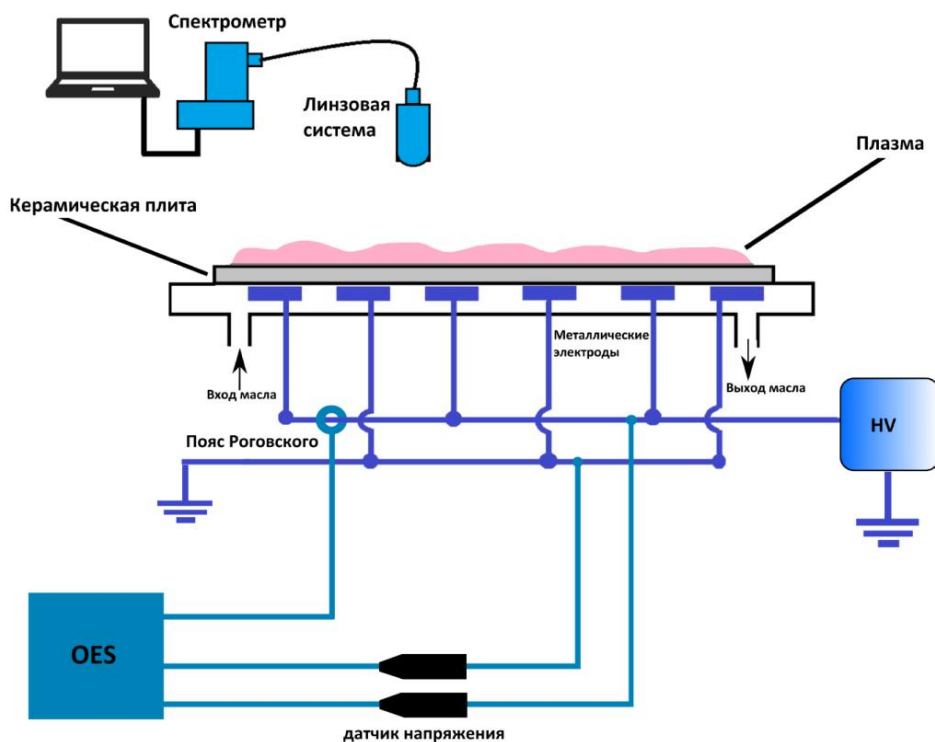
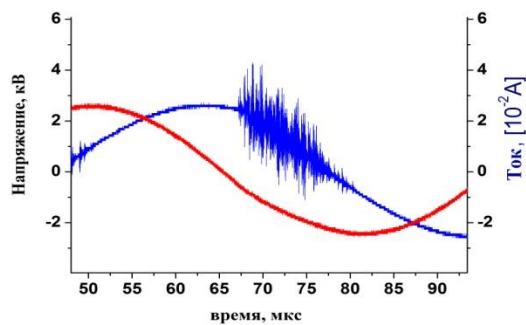


Рисунок 9 – Схематическое изображение измерительной системы ДКПБР

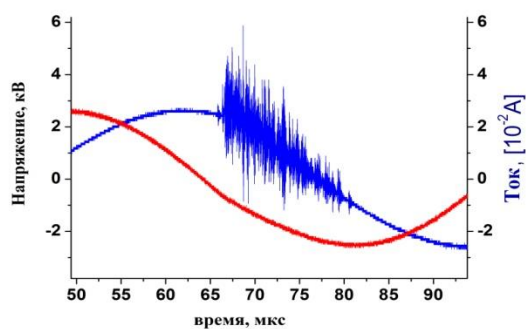
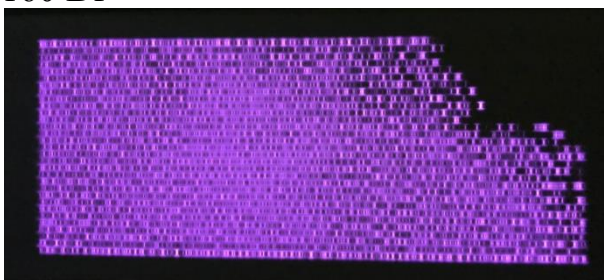
Эксперименты проводились при разных мощностях от 81 Вт до 300 Вт с шагом 20 Вт. Результаты показали, что число микроразрядов начинает расти с увеличением мощности, постепенно заполняя поверхность. При установлении мощности 220 Вт микроразряды полностью заполняют поверхность установки. На рисунке 10 приведены результаты экспериментов, заполнение микроразрядами поверхности при значениях мощности 120 Вт (поверхность

установки заполнена не полностью) и 220 Вт (поверхность установки заполнена полностью), соответственно.

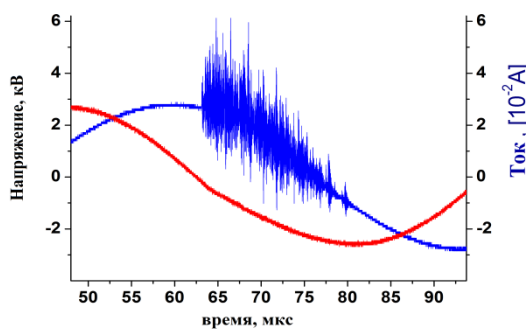
120 Вт



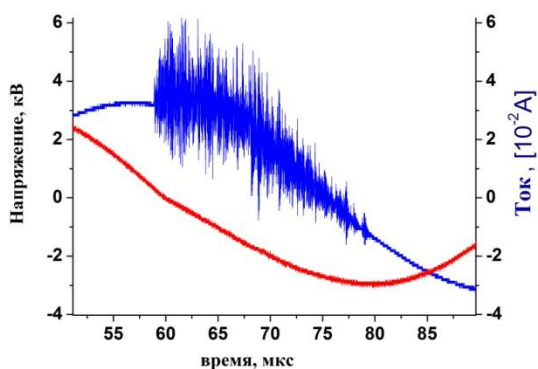
160 Вт



220 Вт



300 Вт

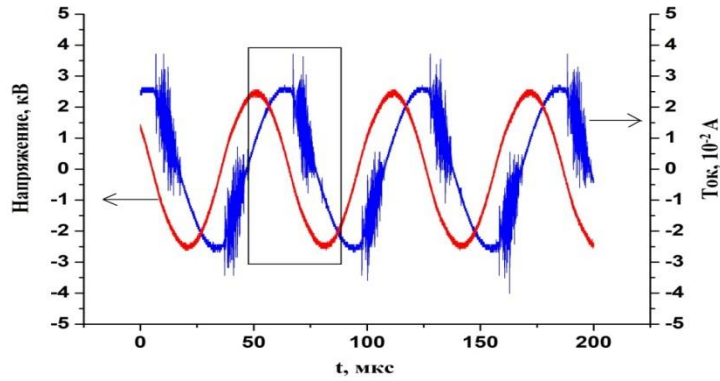


а)

б)

Рисунок 10 – Изображения поверхности экспериментальной установки при разных мощностях (а) и их вольт-амперные характеристики (б)

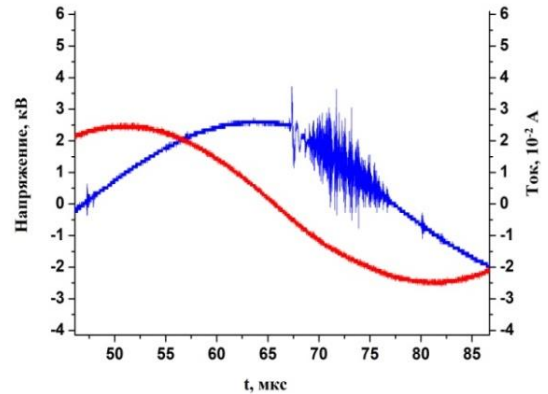
Исследована вольт-амперная характеристика ДКПБР. Показано, что ДКПБР носит емкостный характер, с наблюдаемыми пиками разрядного тока поверх тока смещения, которые возникают из одиночных стримеров (рисунок 11).



а)



б)



в)

Рисунок 11 – а) Вольт-амперная характеристика ДКПБР для частоты повторения импульсов $f=16,5$ кГц и напряжения $U = 3$ кВ; б) фотография поверхности ДКПБР при подаваемой мощности 81 Вт и частоты повторения импульсов $f=16,5$ кГц; в) пики разрядного тока поверх тока смещения

Суммарная мощность, потребляемая плазмой разряда, рассчитывалась по измеренным значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$:

$$P = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} I(t) \cdot U(t) dt. \quad (1)$$

Суммарная мощность составляет в среднем 9 Вт. Ниже, на рисунке 12, приведена зависимость мощности, рассчитанной по измеренным значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ разряда, от подаваемой мощности. Как видно из графика зависимость имеет линейный характер, при этом суммарная мощность на порядок меньше подаваемой. Высокие токи и напряжения создают нагрузку

на цепь источника питания и в конечном счете существенно увеличивают потери мощности в электрической цепи и на диэлектриках [8, с. 60]. Зависимость суммарной мощности, рассчитанной по значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ разряда, от подаваемой мощности приведена на рисунке 12.

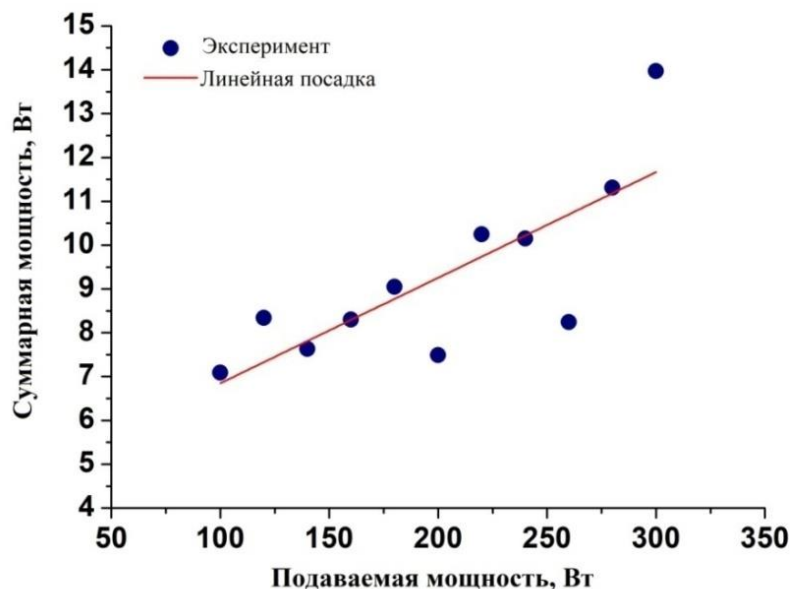


Рисунок 12 – Зависимость суммарной мощности, рассчитанной по значениям тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ разряда, от подаваемой мощности

2.2 Исследование микроразрядной структуры диэлектрического барьерного разряда

Неравновесная низкотемпературная плазма (ННП) при атмосферном давлении является эффективным источником биохимически активных частиц (метастабилы, радикалы, атомы и т. д.), конкретный состав которых определяется газовой смесью и типом разряда, используемого для генерации ННП. В частности, объемный барьерный разряд (ОБР) давно и широко используется в научных и практических целях для создания НТП [95,96]. Поэтому исследование свойств данного вида разряда является ключевым фактором в дальнейшем его применении. С этой целью произведено исследование влияния продольного потока воздуха при атмосферном давлении на поведение микроразрядов [97,98].

Для проведения экспериментов с ОБР были изготовлены три газоразрядные ячейки, отличающиеся только величиной межэлектродного расстояния. Конструкция электродов в разрядных ячейках имела рельсовую геометрию и состояла из двух параллельно расположенных кварцевых трубок ($\epsilon=3,5$) с внешним и внутренним диаметром 7,7 и 5,9 мм и длиной 10 см. Воздушный зазор по кратчайшему расстоянию между поверхностями трубок составлял $h=3, 4$ и 5 мм. К боковым сторонам трубок герметически плотно прижаты две прозрачные пластины из кварца для наблюдения за разрядом.

Кварцевые трубки наполнены соленой водой (21,5 г. соли на 0,2 л воды). Внутри трубок вдоль их оси натянуты медные проволоки диаметром 1,77 мм, одна из которых заземлялась через малоиндуктивный токовый шунт с сопротивлением $R=51$ Ом, а ко второй проволоке подводилось высокое напряжение от синусоидального генератора PVM 500. С учетом размеров диэлектрических вставок для крепления проволок, длина разрядной зоны составляла 40 мм. Частота и амплитуда синусоидального напряжения могли варьироваться в диапазоне 20–30 кГц и 10–15 кВ соответственно [97, с. 15; 98, с. 461].

Все эксперименты выполнены в потоке воздуха (при комнатной температуре), направленном вдоль трубок. Скорость газового потока внутри ячейки варьировалась вплоть до 30 м/с. Измерение средней по времени скорости потока на оси разрядной системы проводилось на выходе из ячейки в отсутствие разряда трубкой Пито диаметром 0,5 мм, снабженной микроманометром ММН-2400 (5)-1.

Схема на рисунке 13 поясняет синхронизированную работу синусоидального генератора, 4-канального цифрового осциллографа (LeCroy WJ354A, 500 МГц) и высокоскоростной камеры (PhantomVEO 710S), снимающей с частотой 40000 кадров в секунду и временем экспозиции каждого кадра 20 мкс. Съемка микроразрядов велась в перпендикулярном к ним направлении сквозь прозрачную кварцевую пластину. Вся схема запускалась включением ключа К1, подающего напряжение питания на синусоидальный генератор. Сигнал с генератора задержки запускал в нужный момент высокоскоростную камеру. Напряжение на разряде измерялось высоковольтным делителем Tektronix P6015 (1:1000), сигнал с которого включал осциллограф. Ток разряда измерялся токовым шунтом. На рисунке 14 показана типичная осциллограмма напряжения (1 канал) и тока (2 канал) объемного барьерного разряда, а также прямоугольный импульс генератора задержки, запускающий камеру (3 канал), и синхронизированные с током и напряжением импульсы камеры, показывающие моменты снятия кадров, время экспозиции кадров и интервал между кадрами (4 канал) [97, с. 15].

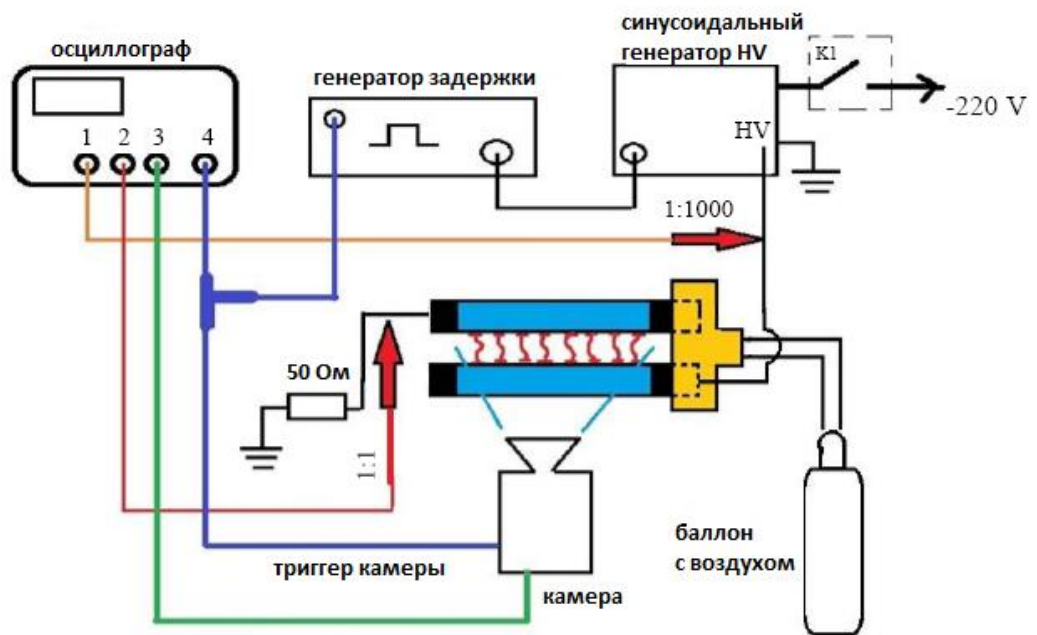


Рисунок 13 – Экспериментальная установка, функциональная схема оборудования по созданию и исследованию барьерного разряда в потоке воздуха

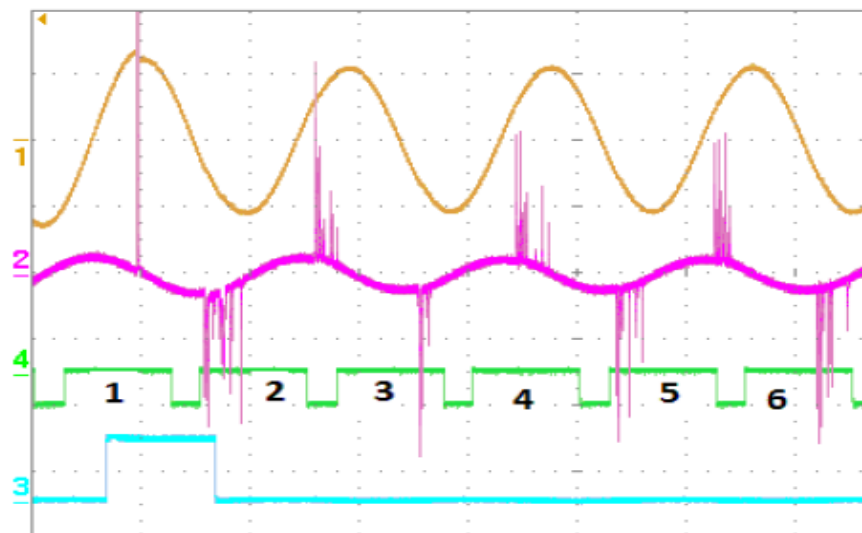


Рисунок 14 – Типичный набор синхронизованных осциллограмм напряжения (1 канал) и тока (2 канал) барьерного разряда, прямоугольного импульса генератора задержки, запускающего быструю камеру (3 канал), и импульсов камеры, показывающих место кадров на временной оси, время экспозиции кадра и интервал между кадрами (4 канал). Масштабы: 1 канал – 10 кВ/дел; 2 канал – 39,2 мА/дел; $[t] = 20$ мкс/дел. Скорость потока вдоль оси ячейки $V = 3$ м/с

Каждый микрозаряд соответствует локальному пробою межэлектродного промежутка и сопровождается своим токовым импульсом. Сложение этих импульсов формирует осциллограмму полного тока ОБР. В каждом полупериоде микрозаряды появляются стохастически, что приводит к неповторяемости амплитуды и количества импульсов тока от полупериода к полупериоду. Съемка ОБР сверхскоростной камерой показала, что в отсутствие потока токовые каналы микрозарядов представляют собой тонкие и прямые шнуры, которые перпендикулярны электродам и сохраняют свое местоположение в течение примерно 100 периодов приложенного напряжения. Каждый канал опирается на тонкие приэлектродные слои, простирающиеся вдоль электродов практически симметрично влево и вправо от канала на расстояние не более 0,5 мм [97, с. 16].

Ситуация меняется при включении потока. В этом случае токовые каналы сносятся потоком и большинство (но не все) становятся слегка изогнутыми в направлении потока (рис. 15, 16), а у некоторых каналов наблюдается как бы разрыв посередине. С ростом скорости потока отмечается увеличение светового диаметра токового канала и длины приэлектродных областей, что в среднем приводит к увеличению расстояния между соседними микрозарядами. Кроме того, чем больше скорость, тем чаще наблюдается, что некоторые каналы микрозарядов как бы исчезают на некоторое время, но затем вновь появляются ниже по потоку. Скорость V движения вдоль потока плазменных каналов выбранных микрозарядов (МР), рассчитанная по смещению их изображений на снимках I–IV (рис. 15, 16), а также их средняя скорость $\langle V \rangle$ за все время съемки приведена в таблицах 1,2 [97, с. 17].

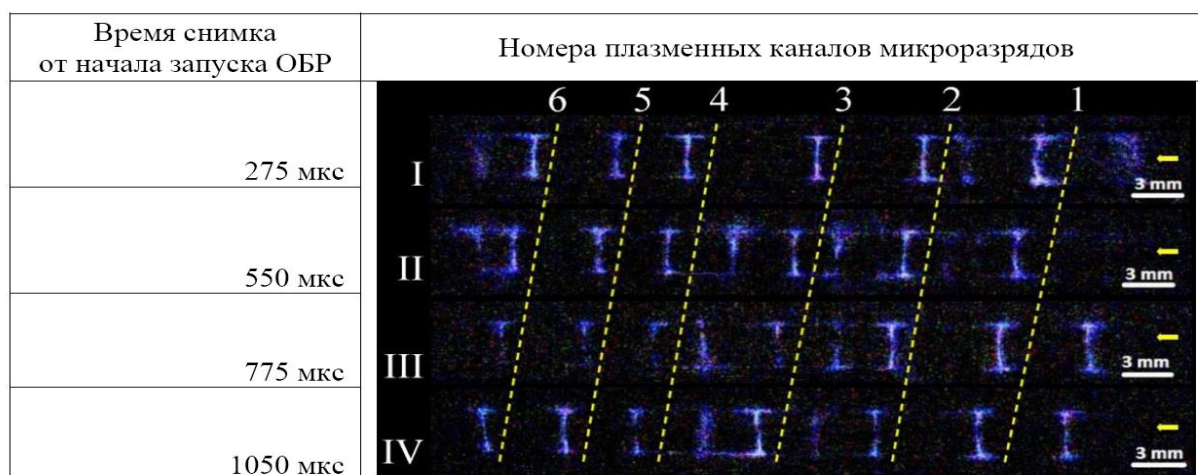


Рисунок 15 – Развертка во времени поведения микрозарядов, показывающая их движение вдоль потока и стохастический характер возникновения токовых каналов. Показаны четыре изображения, снятые из средней части рельсовых электродов с экспозицией 25 мкс. Поток направлен справа налево. Пунктирные линии показывают положение выделенного токового канала на разных снимках. Средняя скорость потока $V \approx 5$ м/с, $h = 3$ мм

Таблица 1 – Скорость V движения вдоль потока плазменных каналов выбранных микроарядов (МР), рассчитанная по смещению их изображений на снимках I–IV (рис. 15), а также их средняя скорость $\langle V \rangle$ за все время съемки

| Скорость канала МР | Номера плазменных каналов микроарядов | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $V(I \rightarrow II)$, м/с | 4,9 | 4,5 | 5,2 | 4,4 | 4,2 | 4,8 |
| $V(II \rightarrow III)$, м/с | 4,9 | 3,8 | 5,0 | 4,0 | 3,7 | 3,3 |
| $V(III \rightarrow IV)$, м/с | 4,8 | 3,4 | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,3 |
| $\langle V \rangle$, м/с | $4,9 \pm 0,1$ | $3,9 \pm 0,6$ | $4,9 \pm 0,3$ | $4,1 \pm 0,3$ | $4,2 \pm 0,5$ | $4,1 \pm 0,7$ |

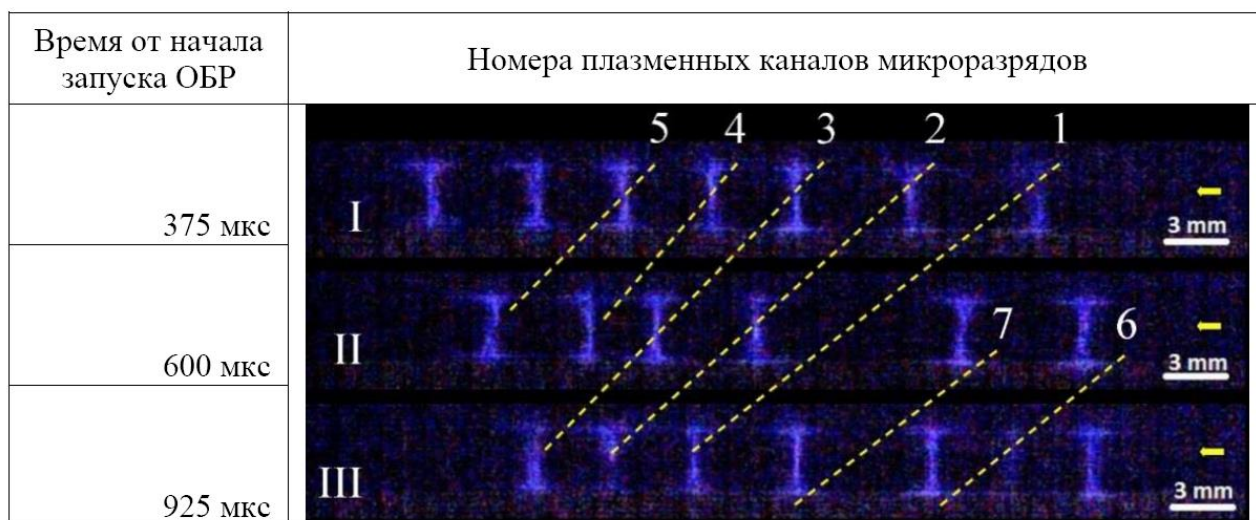


Рисунок 16 – Развертка во времени поведения микроарядов в межэлектродном промежутке, показывающая их движение вдоль потока и стохастический характер возникновения токовых каналов. Показаны три изображения, снятые из средней части рельсовых электродов с экспозицией 25 мкс. Поток направлен справа налево. Пунктирные линии показывают положение выделенного токового канала на разных снимках. Средняя скорость потока $V \approx 30$ м/с. Межэлектродное расстояние $h = 3$ мм. Заземленный электрод расположен сверху каждого кадра

Таблица 2 – Скорость V движения вдоль потока плазменных каналов выбранных микроарядов (МР), рассчитанная по смещению их изображений на снимках I–III (рис. 16)

| Скорость канала МР | Номера плазменных каналов микроарядов | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| $V(I \rightarrow II)$, м/с | – | 32,2 | 29,6 | 26,6 | 27,2 | – | – |
| $V(II \rightarrow III)$, м/с | – | 33,4 | – | – | – | 22,8 | 24,7 |
| $V(I \rightarrow III)$, м/с | 30,0 | – | – | – | – | – | – |

Отмеченные особенности микрозарядов в потоке хорошо видны на рисунках 15 и 16, на которых приведены изображения микрозарядов, снятые в разные моменты времени в средней части рельсовой электродной системы при межэлектродном расстоянии $h = 3$ мм и при средних скоростях потока $V = 5$ и 30 м/с. Заземленный электрод находится сверху каждого кадра.

Используя фотографии на рисунках 2 и 3, рассчитаны скорости переноса плазменных каналов в воздушном потоке в разные интервалы времени длительностью примерно по 250 мкс каждый и отстоящие на разное время от начала возбуждения барьерного разряда. Полученные результаты для скоростей потока $V = 5$ и 30 м/с представлены в табл. 1 и 2. Как видно, скорости плазменных каналов не одинаковы и заметно флуктуируют в большую и меньшую сторону относительно средней скорости потока, причем, чем больше скорость потока, тем больше величина флуктуаций. С ростом межэлектродного зазора h увеличивается среднее расстояние между соседними микрозарядами, а также усиливается стохастичность в поведении микрозарядов, сопровождаемая увеличением числа исчезающих и вновь возникающих ниже по потоку каналов микрозарядов. Средняя мощность барьерного разряда слабо зависит от скорости, но слегка падает с ростом h [97, с.18].

Обсуждение результатов проводится на основе вполне разумного предположения, что при атмосферном давлении плазменные каналы микрозарядов являются «вмороженными» в нейтральный газ и потому переносятся вместе с ним. Справедливость данного предположения усиливается также тем обстоятельством, что перенос плазмы производится в направлении поперек электрического поля разряда. Другими словами, в объеме разряда, где практически отсутствует продольная компонента электрического поля, которая могла бы повлиять на перенос заряженных частиц вдоль потока, движение плазмы полностью коррелирует с движением газового потока. Другой факт, который принимается во внимание, это отсутствие переноса поверхностных зарядов газовым потоком, т. е. поверхностные заряды считаются фиксированными в месте своего отложения на поверхности барьеров [97, с. 18].

Для качественного объяснения полученных результатов необходимо также учесть, что газовый поток внутри разрядной ячейки переходит в турбулентный режим при меньших числах Рейнольдса по сравнению с потоком в гладкой трубе, в которой критическое число $Re \approx 2300$. Этому способствуют две причины. Первая – поперечное сечение разрядной ячейки имеет сложную форму, конфигурация которой создает сильное торможение потока в зонах состыковки диэлектрических трубок с боковыми пластинами, что способствует интенсивному вихреобразованию в потоке. Вторая – как показано в [99], микрозаряды импульсно и локально выделяют энергию в газовом потоке, что создает сильные газодинамические возмущения и способствует турбулизации потока. Таким образом, во всех исследованных режимах газовый поток в барьерном разряде является турбулентным и вихревым. Размер вихрей и частота их вращения определяются геометрией ячейки и скоростью потока

соответственно. В условиях наших экспериментов характерная частота вихрей находится в килогерцовом диапазоне [97, с.18].

С учетом вышесказанного можно утверждать, что эксперименты с барьерным разрядом в потоке газа ясно свидетельствуют об определяющей роли плазмы токового канала микроразряда в формировании его пространственной памяти. Другими словами, место возникновения микроразряда в следующем полупериоде синусоидального напряжения определяется не локализацией поверхностного заряда, отложенного на барьерах в предыдущем полупериоде, но местом, в которое газовый поток переносит плазму предыдущего токового канала. Турбулентность потока и наличие в нем вихрей существенно влияют на взаимное расположение микроразрядов вдоль электродов и возможность их возникновения в конкретном полупериоде. Действительно, если плазменный канал подхвачен вихрем, элемент которого в данный момент движется в направлении потока, то скорость плазменного канала будет превышать среднюю скорость газового потока. В противоположном случае скорость канала будет меньше скорости потока. Если вихрь выносит плазменный канал вбок из зоны с максимальным электрическим полем, то очередного пробоя, т. е. микроразряда, в межэлектродном промежутке не будет до тех пор, пока вращение вихря не вернет вновь плазменный канал в зону с максимальным электрическим полем. Представленное объяснение согласуется с данными эксперимента [97, с. 18].

2.3 Диагностика оптических свойств плазмы поверхностного диэлектрического разряда

Разряды атмосферного давления имеют широкую область применения в агропромышленности и медицине в качестве источников для генерации химически активных видов. Определение параметров плазмы (температуры газа, функции распределения электронов и плотности электронов) является обязательным условием для успешного применения в различных сферах. Функция распределения электронов и электронная плотность необходимы для эффективной оптимизации и, таким образом, безопасного применения источников плазмы. Характеристика источников плазмы, работающих при атмосферном давлении является сложной задачей из-за высокой плотности газа и заряженных частиц при малых объемах плазмы [100].

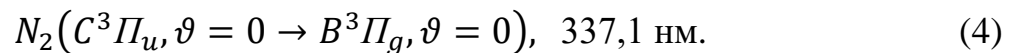
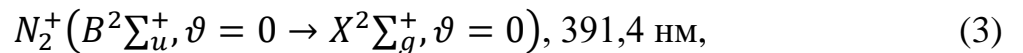
В этой работе для определения приведенного электрического поля (E/n) диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда использовался метод измерения оптико-эмиссионной спектроскопии и решения уравнения Больцмана. Измерения интенсивностей спектральных линий азота и их сравнения выполнены с помощью оптического спектрографа. Для решения уравнения Больцмана для неравновесной плазмы использован открытый программный пакет BOLSIG+ [101]. Выбранный метод отличается достаточной простотой, доступностью и универсальностью [100, с. 36].

С целью предварительного исследования химического состава и кинетических реакций разряда изучены оптические свойства диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда. Для этого использован оптико-эмиссионный спектрометр фирмы Solar Systems. Спектрометр состоит из оптической системы, собранной в единый блок для регистрации сигнала, оптического волокна для передачи излучения и из самого спектрометра. Далее полученный сигнал обрабатывается через персональный компьютер. Время экспозиции варьировалось между 500-1500 мкс, для уменьшения шумов измеренный спектр окружающего фона был исключен через программное обеспечение спектрометра. Схематическое изображение измерительной системы ДКПБР показано на рисунке 2 [100, с. 38; 102].

Авторы работы [103] предложили использовать приближение (2) для оценки напряженности электрического поля в стримерных разрядах в воздухе. Используя результаты численного решения уравнения Больцмана для широкого диапазона приведенной напряженности поля, они также рассчитали зависимость определяемого по (2) отношения интенсивности I_B/I_C от параметра E/n в квазистационарных условиях. I_B/I_C выражает соотношение интенсивностей линий азота, это значение находится в ходе эксперимента через получаемый спектр, а коэффициент k (константа скорости реакций), находящийся в правой части уравнения (2) вычисляется численным методом через программу BOLSIG+ [100, с. 41; 101, с. 15]:

$$R = \frac{I_B\left(\frac{E}{n}\right)}{I_C\left(\frac{E}{n}\right)} = \frac{k_B\left(\frac{E}{n}\right)\tau_0^C T_B \tau_{air}^B}{k_C\left(\frac{E}{n}\right)\tau_0^B T_C \tau_{air}^C}, \quad (2)$$

где R - соотношение интенсивностей линии азота, I - интенсивность вращательной структуры, k - константа скорости реакции, τ_0 - время жизни возбужденных или ионизованных состояний молекул азота, T - параметр который зависит от чувствительности фотодетектора, τ_{air} - время жизни в воздухе, индексы B и C указывают на следующие реакции (ионизация и возбуждение) молекулы азота [100, с. 42; 104]:



Другие величины постоянны для определенных экспериментальных условий (Таблица 3).

Таблица 3 – Постоянные для определенных экспериментальных условий

| Реакция молекулы азота | Радиационное время τ_0 (нс) | Эффективное время жизни в воздухе τ_{air} (нс) |
|---|----------------------------------|--|
| $(C^3\Pi_u, \vartheta = 0 \rightarrow B^3\Pi_g, \vartheta = 0)$ | 40 | 0,62 |
| $(B^2\Sigma_u^+, \vartheta = 0 \rightarrow X^2\Sigma_g^+, \vartheta = 0)$ | 60 | 0,134 |

Из полученного спектра мы находим отношение интенсивностей первой негативной системы молекулы азота $N_2^+(B^2\Sigma_u^+, \vartheta = 0 \rightarrow X^2\Sigma_g^+, \vartheta = 0)$ ко второй положительной системе молекулы азота $N_2(C^3\Pi_u, \vartheta = 0 \rightarrow B^3\Pi_g, \vartheta = 0)$ которые появляются на длинах волн 391,4 и 337,1 нм, соответственно. Вместе с этим программе BOLSIG+ рассчитывается коэффициент k путем подбора разных значений приведенного электрического поля E/n . BOLSIG+ - это удобное приложение для Windows, предназначенное для численного решения уравнения Больцмана для электронов в слабо ионизированных газах в однородном электрическом поле, условия, которые обычно возникают в основной массе столкновительной низкотемпературной плазмы. В этих условиях распределение энергии электронов определяется балансом между ускорением в электрическом поле и потерей импульса и энергии при столкновениях с нейтральными частицами газа [100, с. 37; 105].

В случае совпадения данных, полученных в ходе эксперимента, с численным результатом (BOLSIG+), мы извлекаем функцию распределения энергии электронов (ФРЭЭ или electron energy distribution function – EEDF в англоязычной литературе). Функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) играет важную роль в определении характеристик низкотемпературной плазмы. Также функция распределения электронов по энергии используется для вычисления константы скорости реакции. В случае несовпадения численных данных с экспериментальными, возвращаемся к подбору E/n в программе BOLSIG+ до полного совпадения [100, с. 38].

В ходе экспериментов подаваемая мощность варьировалась от 200 Вт до 400 Вт с шагом 50 Вт. По приведенным ниже фотографиям поверхности разрядной ячейки видно, что при увеличении подаваемой мощности, поверхность постепенно заполняется микрозарядами (рисунок 17). Равномерное заполнение поверхности разрядной ячейки микрозарядами происходит при мощности 400 Вт [100, с. 38].

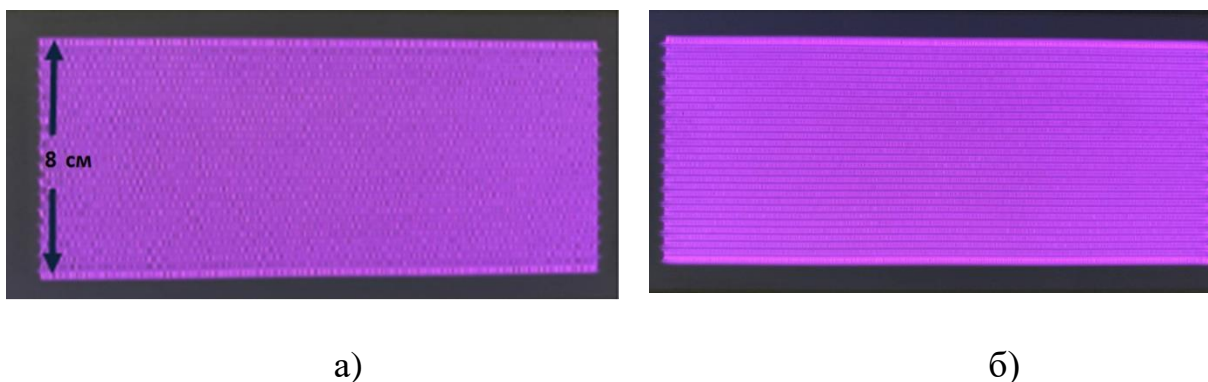
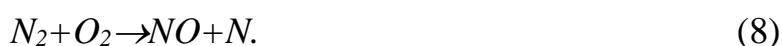
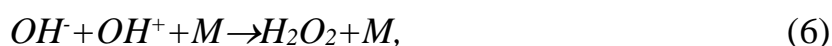


Рисунок 17 – Изображения поверхности разрядной ячейки при мощностях 220 Вт (а) и 400 Вт (б)

Химический состав плазмы определен с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии. В спектре излучения ДКПБР наблюдались молекулярные полосы азота, а именно вторая положительная (N_2 (C-B)) и первая отрицательная (N_2^+ (B-X)) системы. На рисунке 18 наблюдаемые пиковые значения от 300 нм до 470 нм состоят из радикалов OH (308 нм), N_2 (337 нм и 357 нм), N_2^+ (380 нм, 390 нм, 427 нм и 470 нм). Из-за обилия молекул азота в атмосфере, азотные полосы, естественно, являются доминирующими. OH радикалы также видны из-за наличия пара воды в воздухе [16, с. 1113]. Интенсивности выбросов других радикалов, таких как NO, которые ожидаются в условиях, приведенных во влажной атмосфере, были пренебрежимо низкими из-за низкой плотности и эффективного столкновительного гашения соответствующих возбужденных состояний. На рисунках 18 и 19 приведены спектр излучения диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда в диапазоне волн 300-470 нм (слева) и интенсивности линий OH и N_2 при приложенных мощностях 200-320 Вт [102, с. 16]. Значения константы скорости реакции от приведенного электрического поля приведены в таблице 4 [100, с. 38].

Тщательное рассмотрение возможных реакций в плазме диэлектрического барьерного разряда приводит к следующему списку [106]:



Таким образом, можно сказать, что плазма производит реактивные частицы, которые играют ключевую роль в биологических приложениях. К ним относятся активные соединения на основе кислорода (ROS, Reactive oxygen-

based species) и азотсодержащие соединения (RNS, Reactive nitrogen-based species). Объединение этих реактивных соединений в литературе упоминается как RONS (Reactive oxygen and nitrogen species). RONS являются ключевым фактором в инактивации патогенов, поскольку они могут модулировать среду клеток и оказывать влияние на их поведение, прорастание и урожайность растений [107,108].

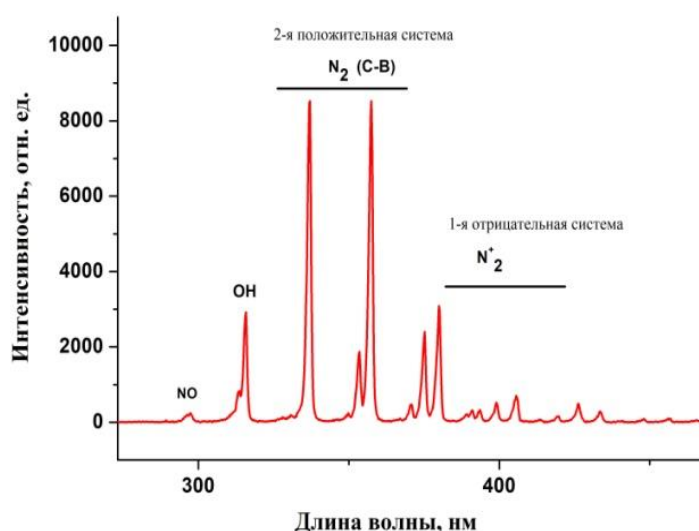


Рисунок 18 – Спектр излучения диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда в диапазоне волн 300-470 нм

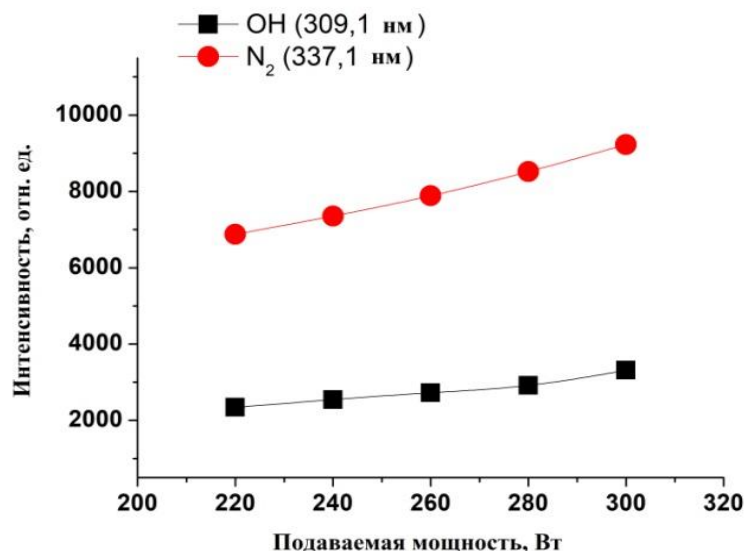


Рисунок 19 – Интенсивности линий OH и N₂ при приложенных мощностях 200-320 Вт

Таблица 4 – Значения константы скорости реакции от приведенного электрического поля

| Приведенное электрическое поле E/n (Тд) | Константа скорости реакции (м ³ /с) | |
|---|---|---|
| | $N_2(C^3\Pi_u, \vartheta = 0 \rightarrow B^3\Pi_g, \vartheta = 0)$ 11 эВ ($\lambda = 337,1$ нм) | $N_2^+(B^2\Sigma_u^+, \vartheta = 0 \rightarrow X^2\Sigma_g^+, \vartheta = 0)$ 18,7 эВ ($\lambda = 391,4$ нм) |
| 420 | 0.2032E-14 | 0.9336E-16 |
| 430 | 0.2085E-14 | 0.1014E-15 |
| 480 | 0.2330E-14 | 0.1465E-15 |
| 520 | 0.2503E-14 | 0.1886E-15 |
| 560 | 0.2658E-14 | 0.2658E-14 |

Значения $T_B(391,4 \text{ нм})$ и $T_C(337,1 \text{ нм})$ выражают чувствительность фотодетектора на соответствующих длинах волн. Данные значения взяты из технической документации. В технической документации оптического прибора Toshiba TDC1304 длина волн начинается с 400 нм, необходимый нам диапазон длин волн находится от 300 до 400 нм, то есть 337,1 нм и 391,4 нм, где измеряются вращательные структуры молекулы азота. Поэтому для измерения чувствительности длин волн 337,1 нм и 391,4 нм графические данные были экстраполированы (рисунок 20). Измеренное таким образом отношение чувствительности фотодетектора на данных длинах волн составило $T_B/T_C = 1.19$ [100, с. 38].

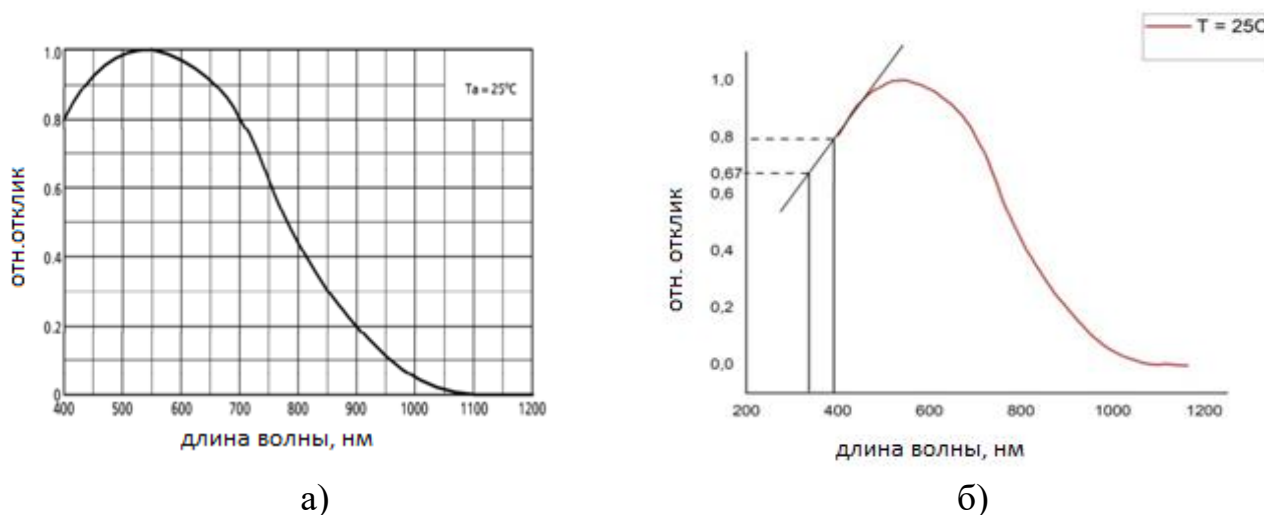


Рисунок 20 – а) чувствительность фотодетектора от 400 до 1200 нм, б) оценка чувствительности для диапазона длин волн 300 - 400 нм с помощью экстраполяции графика [100, с. 39]

Для вычисления значения общей интенсивности спектральных линий азота мы проинтегрировали молекулярный спектр по длине волны с учетом вращательной структуры молекулы. Далее вычислялось их соотношение, что необходимо для сравнения с результатами, полученными с помощью решения уравнения Больцмана.

Для вычисления значений электрического поля использовано программное обеспечение BOLSIG+. Входными параметрами являются значение E/n , состав плазмообразующего газа в процентном соотношении, степень ионизации, температура газа, концентрация частиц. Решение уравнения приводит к значениям величин транспортных свойств, включая константу скорости реакции k , которая в дальнейшем использовалась для численного расчета соотношения спектральных линий. Результаты определения соотношений спектральных линий и их зависимость от значений приведенного электрического поля приведены на рисунке 21. Из рисунка 21 видно, что зависимость соотношений спектральных линий от значений приведенного электрического поля в диапазоне от 400 до 600 Тд носит линейный характер [100, с. 39].

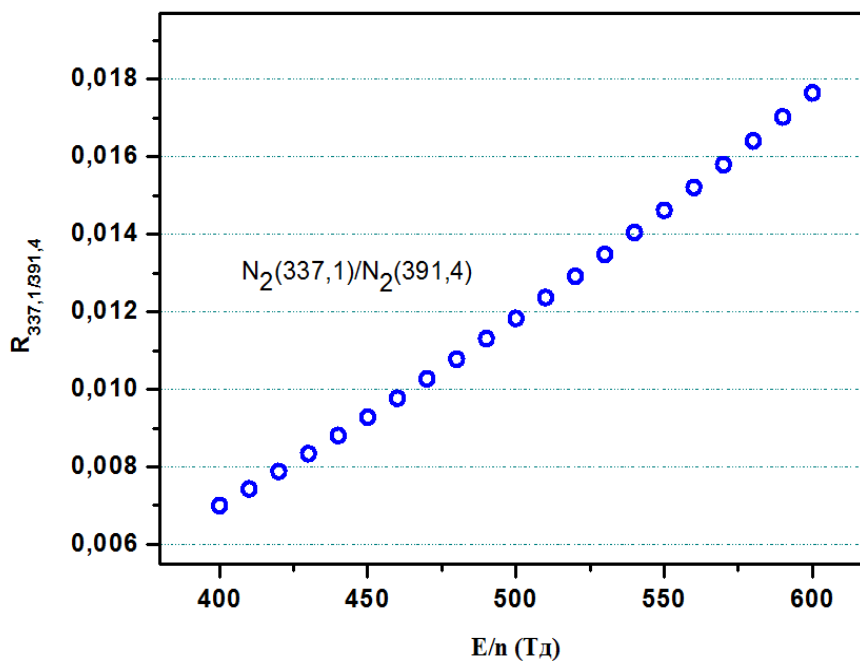


Рисунок 21 – Зависимость приведенного электрического поля от отношения интенсивности спектральных линий $N_2^+(391,4)$ и $N_2(337,1)$ [100]

Данная процедура повторялась для различных значений E/n . На рисунке 22 показана зависимость приведенного электрического поля от мощности разряда. Рост мощности приводит к увеличению E/n , так как увеличение мощности сопровождается ростом высоковольтного напряжения, приложенного к электродам разрядной ячейки [100, с. 38]. Полученные значения E/n низкотемпературной плазмы атмосферного давления хорошо коррелируют с

результатами работ [110], [111], где использовались аналогичные по геометрии системы и те же экспериментальные условия.

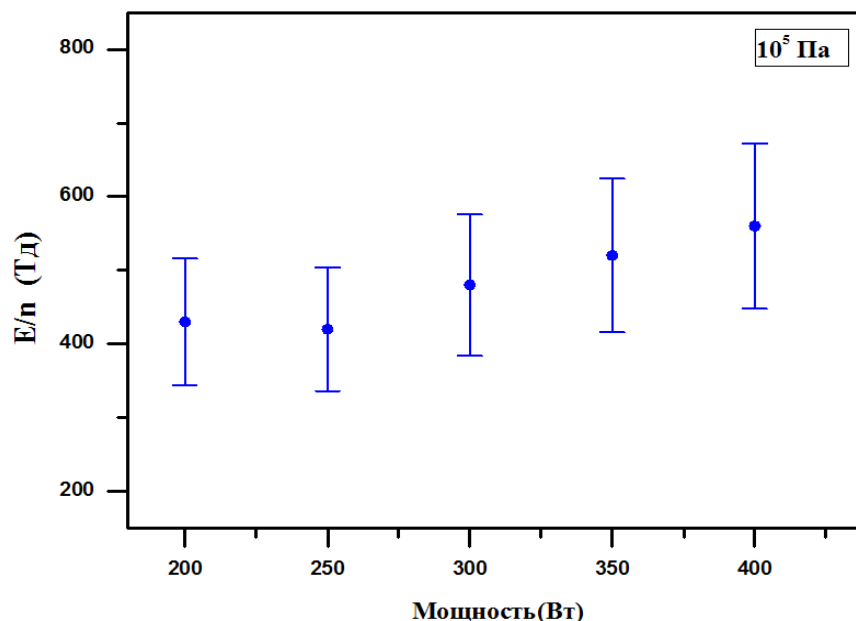


Рисунок 22 – Зависимость приведенного электрического поля от мощности разряда [100]

Функция распределения энергии электронов важна для изучения различных свойств плазмы, поскольку она необходима для характеристики кинетических процессов с участием электронов [105, с. 726]. ФРЭЭ, полученные для различных значений приведенного электрического поля, показывают увеличение энергии, а также числа быстрых электронов в хвосте распределения (рисунок 23). В то же время количество низкоэнергетических электронов несколько уменьшается. Увеличение энергии электронов можно объяснить тем, что увеличение E/n вносит дополнительный вклад в кинетическую энергию электронов, поскольку электроны в основном получают энергию за счет электрического поля, ускоряясь за счет кулоновских сил в газовой среде. В нашем случае увеличение E/n означает прямое увеличение электрического поля, поскольку давление плазмообразующего газа остается постоянным при комнатных условиях. Небольшое уменьшение числа низкоэнергетических электронов связано с тем, что их энергия также увеличивается и они вносят вклад в число высокоэнергетических электронов на хвосте ФРЭЭ [100, с. 41].

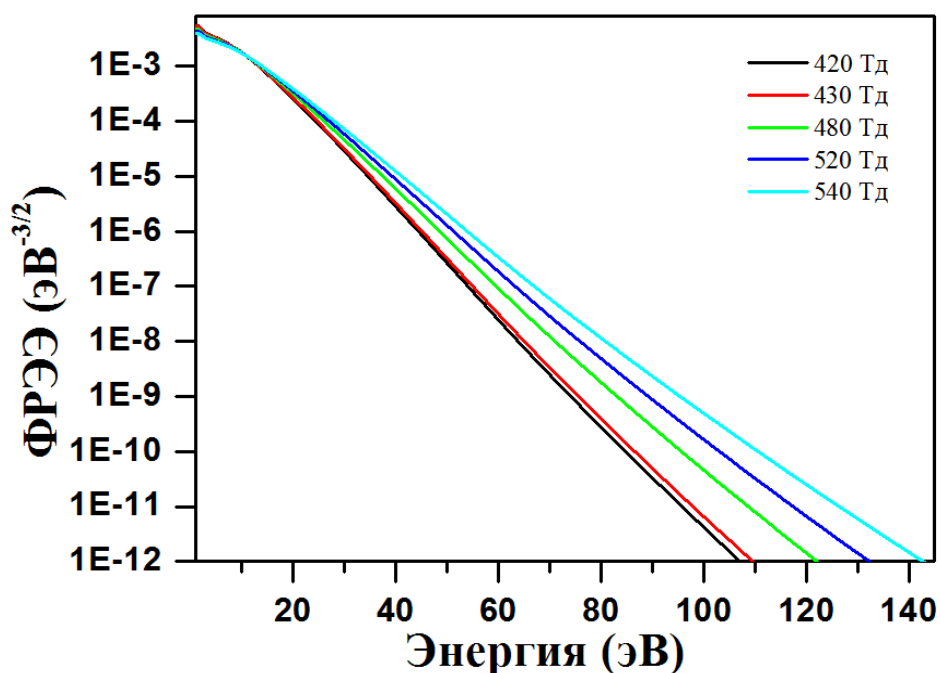


Рисунок 23 – Функция распределения энергии электронов при разных значениях приведенного электрического поля [100, с. 39]

Также решение уравнения Больцмана с помощью программного обеспечения BOLSIG+ помогает определить значение таких транспортных свойств электронов, как средняя энергия, подвижность, коэффициент диффузии и коэффициент Таунсенда (таблица 5) [100, с. 39].

Таблица 5 – Значения некоторых транспортных свойств электронов [100, с. 38]

| Мощность (Вт) | Средняя энергия (эВ) | Подвижность*N ((м*В*с) ⁻¹) | Коэффициент диффузии ((м*с) ⁻¹) | Коэффициент Таунсенда α (м ⁻¹) |
|---------------|----------------------|--|---|--|
| 200 | 8.962 | 0.8318E+24 | 0.5339E+25 | 0.4318E-20 |
| 250 | 9.098 | 0.8264E+24 | 0.8264E+241 | 0.4535E-20 |
| 300 | 9.643 | 0.8067E+24 | 0.5562E+25 | 0.5427E-20 |
| 350 | 10.18 | 0.7888E+24 | 0.5732E+25 | 0.6345E-20 |
| 400 | 10.71 | 0.7722E+24 | 0.5894E+25 | 0.7279E-20 |

Полученные результаты очень важны при использовании газоразрядной плазмы атмосферного давления в различных сферах, так как количественные значения данных параметров дают возможность для моделирования и рассчитывания кинетических свойств низкотемпературной плазмы [100, с. 39].

2.4 Исследование перемещения частиц по поверхности диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда

Проведен ряд экспериментов по исследованию перемещения частиц по поверхности ДКПБР, что является необходимым в случае исследования влияния обработки плазмы на полимерные материалы, биоматериалы, и др. образцы сферической или схожей формы.

Для анализа результатов экспериментов необходимо рассмотреть скатывание шара по наклонной плоскости. На массу, лежащую на наклонной плоскости, действует сила тяжести $F_g = Mg$, с одной стороны, и нормальная сила F_N , с другой стороны, которая действует на массу со стороны плоскости, где M - масса, g - ускорение свободного падения. Сила тяжести направлена F_g к земле, нормальная сила направлена F_N перпендикулярно плоскости.

Результирующая сила называется наклонной силой F_H и параллельна плоскости (рисунок 24)[112].

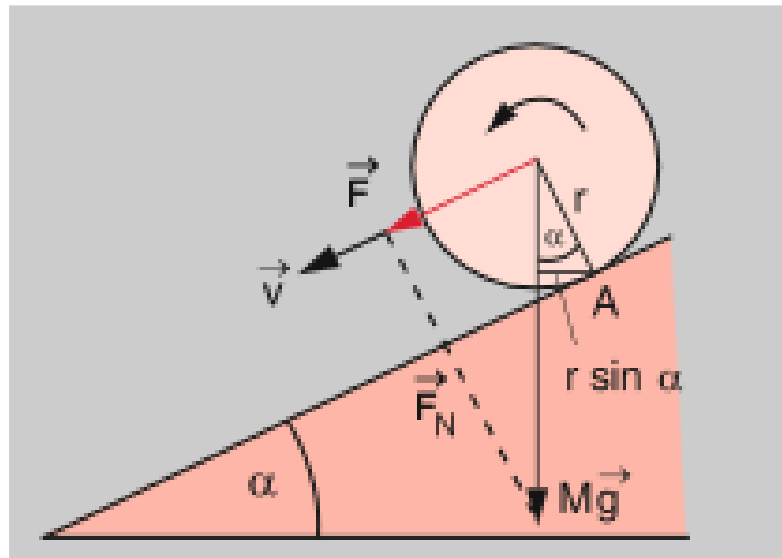


Рисунок 24 – Схема скатывания шара по наклонной плоскости [112, с. 100]

Если плоскость наклонена под углом α , результат для F_H :

$$|F_H| = |F_g + F_N| = Mg \sin(\alpha). \quad (9)$$

Для протяженной массы часть потенциальной энергии преобразуется во вращательную энергию при ее вращении. Для чистого перевода применяется:

$$F_{H, Translation} = F_H \left(1 + \frac{I_s}{MR^2}\right)^{-1}, \quad (10)$$

I_s - момент инерции тела, а R - его радиус.

В случае сферы с однородным распределением массы:

$$|F_{H,Translation}| = \left| \frac{5}{7} F_H \right| = \frac{5}{7} Mgsin(\alpha). \quad (11)$$

В сфере существуют три основных вида трения. Когда тело находится в состоянии покоя, трение покоя F_H обеспечивает то, что тело начинает скользить только при превышении критического угла α . Статическое трение противодействует силе спуска:

$$|F_H| = \mu_H |F_N|. \quad (12)$$

Здесь μ_H — коэффициент статического трения. Он зависит от материалов корпуса и поверхности, а также от фактуры поверхности. Трение скольжения возникает, когда тело уже движется, т. е. преодолевает силу трения покоя. Сила трения скольжения F_G также пропорциональна нормальной силе:

$$|F_g| = \mu_G |F_N|, \quad (13)$$

с коэффициентом трения скольжения μ_G . μ_G зависит от материалов корпуса и поверхности, текстуры поверхности и относительной скорости. Сила трения скольжения всегда меньше силы трения покоя.

Третий вид трения – качение. При скатывании круглого тела с радиусом R возникают силы F_R , обеспечивающие эффективный момент D_R :

$$|D_R| = \mu_R |F_N|. \quad (14)$$

В отличие от двух других типов трения, μ_R зависит от радиуса R . Трение качения меньше, чем трение скольжения [112].

Эксперименты проведены на установке диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда (ДКПБР) Roplass RPS400. Система RPS400 использует копланарный поверхностный барьерный разряд для генерации плазмы атмосферного давления. На рисунке 25 приведен общий вид экспериментальной установки RPS400.

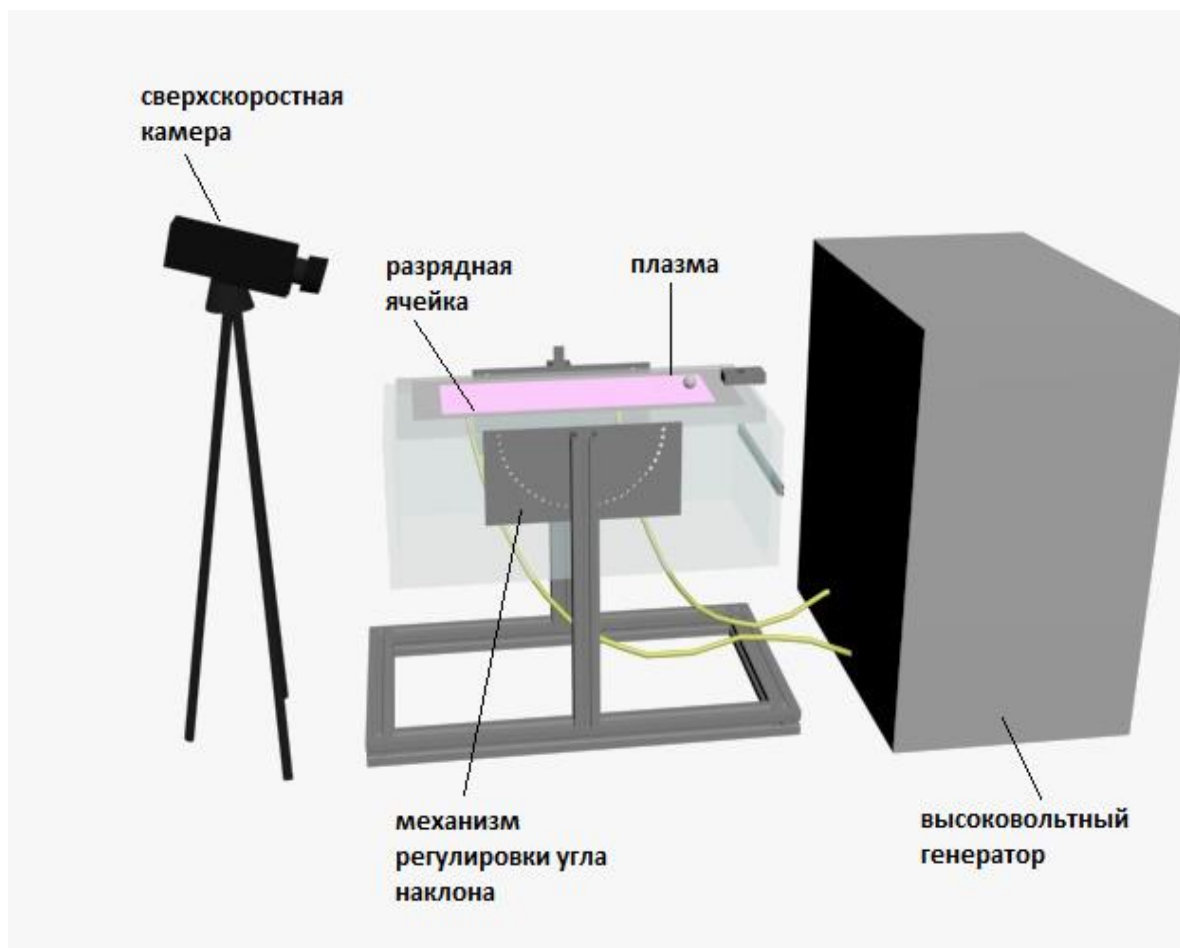


Рисунок 25 – Общий вид экспериментальной установки ДКПБР

Электродная система ДКПБР выглядит следующим образом: ленточные электроды шириной 1,5 мм, толщиной 0,1 мм и длиной 210 мм расположены параллельно друг к другу с расстоянием в 1 мм и покрыты керамическим слоем толщиной 0,4 мм. Разряд включается синусоидальным высоковольтным напряжением (17 кГц, примерно 9 кВ от пика до пика), поставляемым с помощью высоковольтного HV плазменного источника питания. Напряжение регулируется вручную от 50 Вт до 400 Вт, фиксированная мощность при выполнении экспериментов – 260 Вт. Плазма зажигается на поверхности площадью 80 мм*210 мм. Эксперименты проводились при полном заполнении плазмой поверхности установки ДКПБР (рисунок 26).

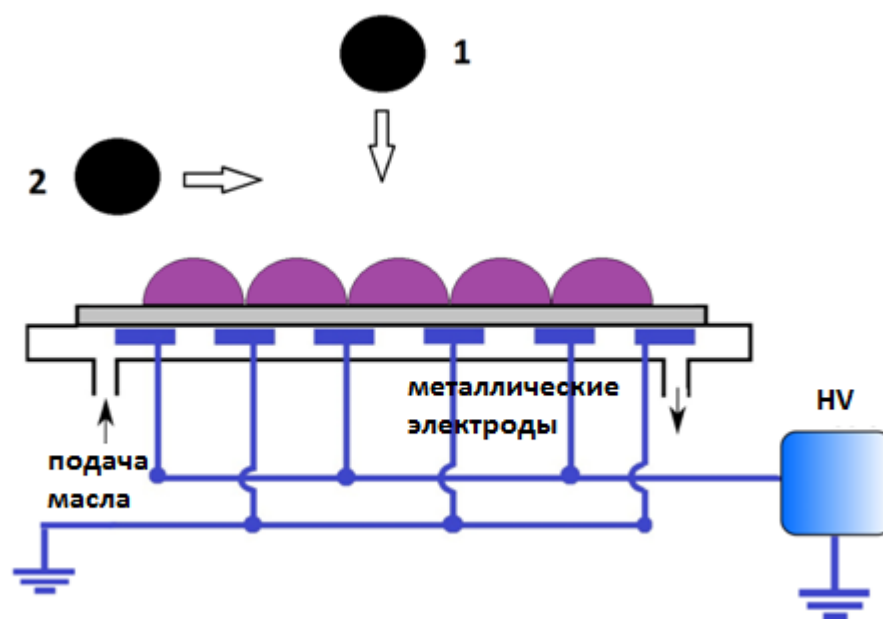


Рисунок 26 – Схема экспериментальной установки. 1 – направление скатывания шара перпендикулярно электродам, 2 - направление скатывания шара параллельно электродам

Для проведения исследований по зарядке и движению сферических частиц в диэлектрическом копланарном поверхностном барьерном разряде при атмосферном давлении установка была модернизирована, а именно сделана рама, позволяющая менять угол наклона поверхности установки от 0° до 90°.

Использованы три вида шаров: из нержавеющей стали, оксида циркония и пластика, диаметром 2 мм и 5 мм из каждого материала. Параметры шаров приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры шаров

| Материал шаров | Диаметр, 10^{-3} м | Площадь поверхности, м^2 | Плотность, 10^3 кг/м^3 | Масса, 10^{-6} кг |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Нержавеющая сталь | 2 | $12,6 \cdot 10^{-6}$ | 7,895 | 33 |
| | 5 | $78,5 \cdot 10^{-6}$ | 7,895 | 510 |
| ZrO ₂ (керамика) | 2 | $12,6 \cdot 10^{-6}$ | 6,053 | 25,3 |
| | 5 | $78,5 \cdot 10^{-6}$ | 6,053 | 396 |
| РОМ (пластик) | 2 | $12,6 \cdot 10^{-6}$ | 1,459 | 6,1 |
| | 5 | $78,5 \cdot 10^{-6}$ | 1,459 | 95 |

Для исследования движения частиц в плазме и влияния плазмы на поведение частиц, эксперименты проводились как без включения, так и с включением плазмы, также шары прокатывались перпендикулярно к горизонтальной составляющей внешних электрических полей (параллельно электродам, рисунок 27(а)) и параллельно к горизонтальной составляющей

внешних электрических полей (перпендикулярно электродам, рисунок 27 (б)). Угол наклона поверхности установки менялся от 5° до 20° с шагом 5°.

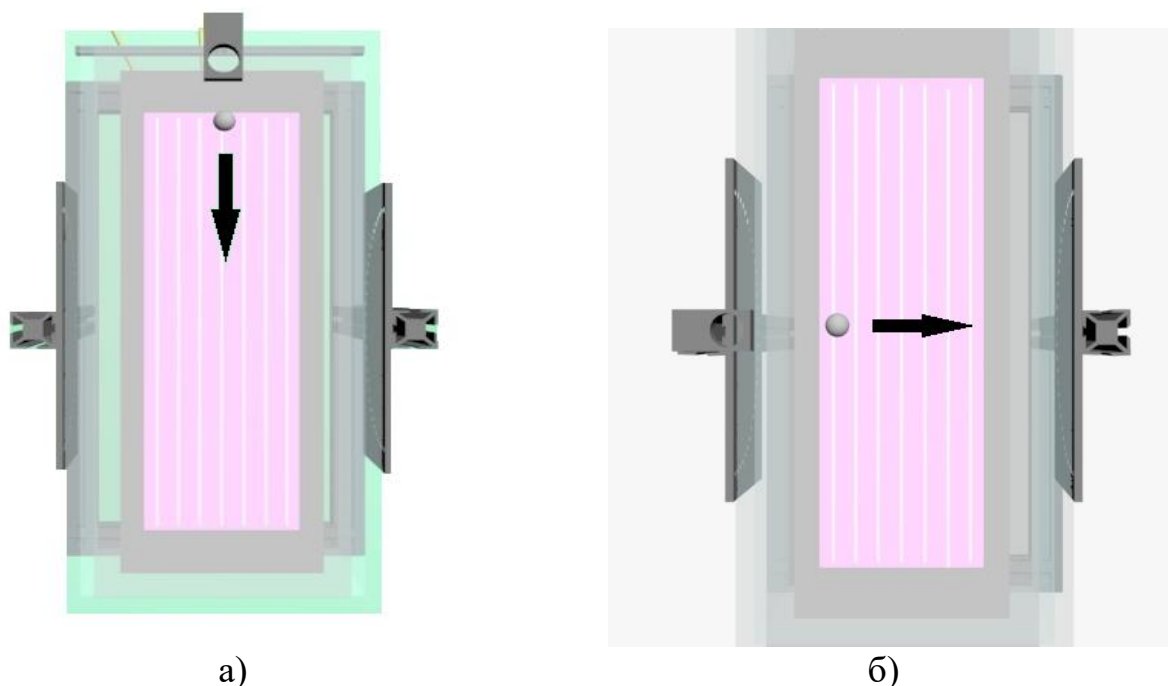


Рисунок 27 – Направления прокатки шаров по поверхности ДКПБР, вид сверху, а) перпендикулярно к горизонтальной составляющей внешних электрических полей, б) параллельно к горизонтальной составляющей внешних электрических полей

Для исключения термического эффекта был проведен ряд экспериментов: температура поверхности ДКПБР нагревалась до 60° С, что соответствует температуре поверхности установки при включении плазмы.

Для исследования поведения шаров при скатывании по поверхности ДКПБР при включении плазмы и без использовалась сверхскоростная камера MotionProY4, скорость камеры при съемке 2000 fps, время экспозиции 1500 с.

Результаты исследований по движению сферических частиц в диэлектрическом копланарном поверхностном барьерном разряде при атмосферном давлении были получены при расчете ускорения движения частиц при включении плазмы и сравнении их с линейным ускорением движения частиц по наклонной плоскости (то есть, без плазмы).

$$a = g \frac{\sin\alpha}{1 + \frac{I}{mR^2}}. \quad (15)$$

Ниже, на рисунках 28-30, приведены графики ускорения движения частиц по поверхности ДКПБР в зависимости от угла наклона поверхности установки и в сравнении с ускорением движения частицы по наклонной плоскости.

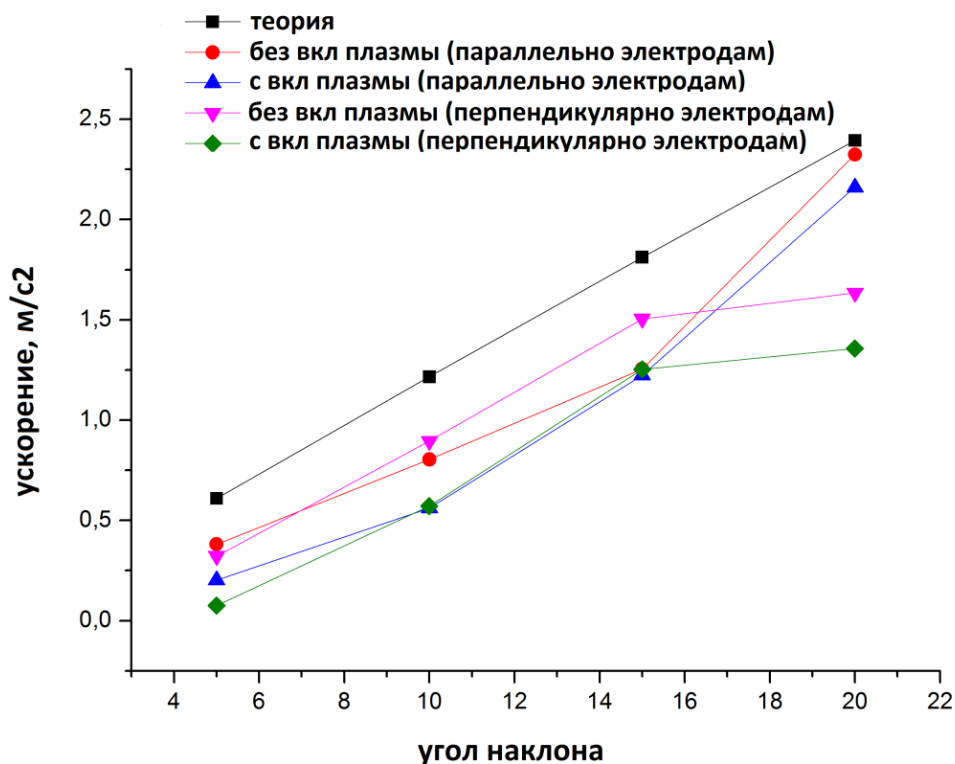


Рисунок 28 – Зависимость ускорения движения частиц из пластика (2 мм) по поверхности ДКПБР в зависимости от угла наклона

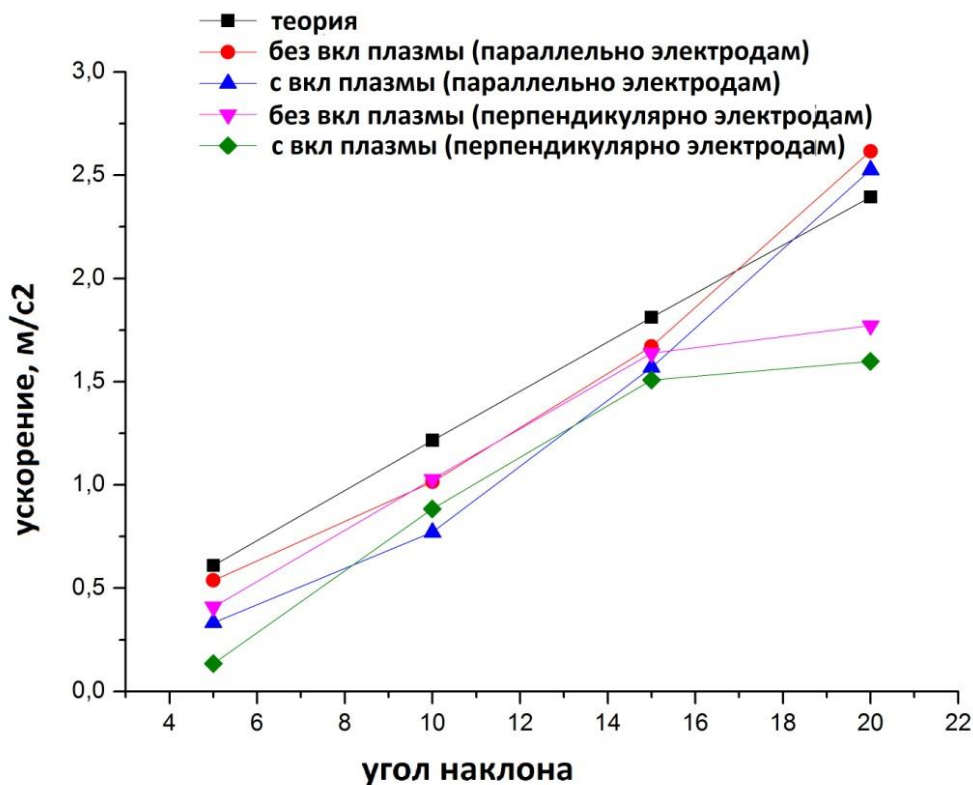


Рисунок 29 – Зависимость ускорения движения частиц из оксида циркония (ZrO₂) (2 мм) по поверхности ДКПБР в зависимости от угла наклона

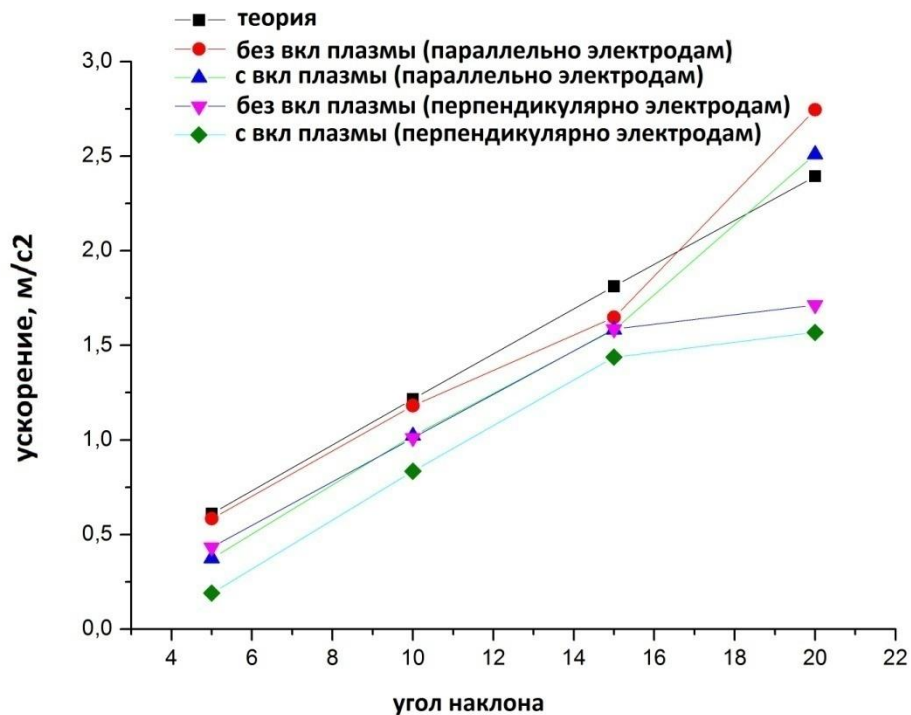


Рисунок 30 – Зависимость ускорения движения частиц из нержавеющей стали (2 мм) по поверхности ДКПБР в зависимости от угла наклона

Как и ожидалось, при бóльших значениях диаметра и массы шаров ускорение движения становится больше как при включении плазмы, так и без нее.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- ускорение шаров при включении плазмы меньше, чем без плазмы, что может свидетельствовать о тормозном характере плазмы. Это может быть связано с тем, что плотность частиц воздуха над поверхностью ДКПБР больше плотности частиц воздуха в случае отсутствия плазмы. Данный факт также может быть следствием появления так называемого "электрического ветра" (электрогидродинамический эффект) при включении плазмы. Он возникает из-за связи заряженных частиц с нейтральными в системах слабоионизированных газов, вызывается электрогидродинамической силой, создаваемой ускоренным электрическим полем заряженных частиц в результате передачи импульса от заряженных частиц к нейтралам;

- ускорение шаров в случае, когда направление движения шаров было перпендикулярно электрическому полю, больше, чем в случае, когда направление движения шаров совпадало с направлением электрического поля. Это может быть связано с тем, что во втором случае ионные токи, возникающие в плазме, могут сообщать передачу импульса по направлению прокатки шаров.

Сопротивление нейтралов индуцирует электрическое поле за счет разделения зарядов между ионами и электронами в магнитном поле, в то время как ионное сопротивление, возникающее из-за электрического и магнитного полей, воздействует на нейтралы. Электрический ветер (также именуемый ионным ветром) является одним из известных случаев этого эффекта. Как было упомянуто выше, он создается электрогидродинамической (ЭГД) силой в электрически заряженных жидкостях, таких как слабоионизированная плазма и ионные растворы. ЭГД-сила на единицу объема в слабоионизованном газе может быть аппроксимирована как

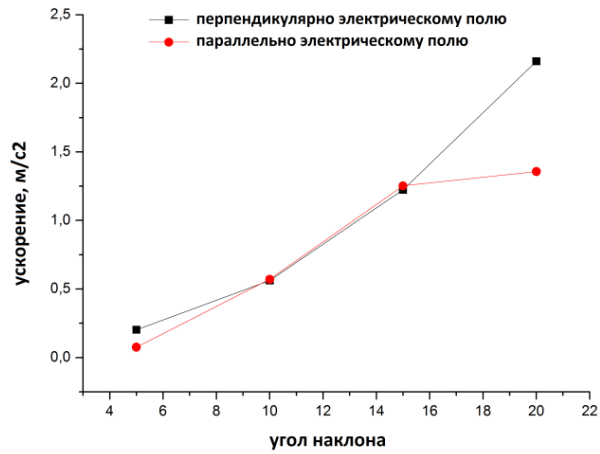
$$F_{i,e-n} \approx q(n_i - n_e)E = \frac{j_i}{\mu_i} - \frac{j_e}{\mu_e}, \quad (16)$$

где q - элементарный заряд, n_i (n_e), j_i (j_e), μ_i (μ_e) - плотность, плотность тока и подвижность ионов (электронов) соответственно, E - электрическое поле.

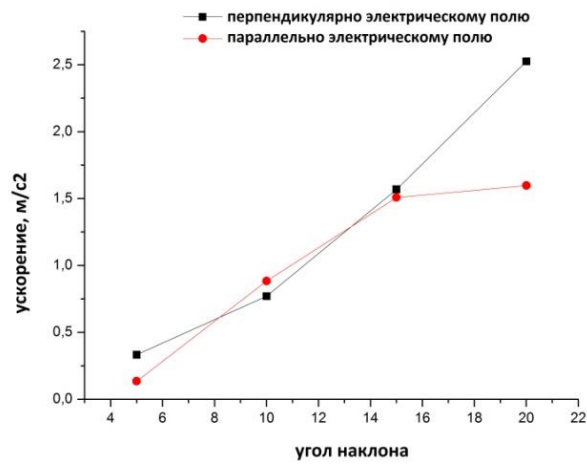
Электрический ветер может вызывать такие эффекты, как модификация генерации и распространения стримеров, тем самым изменяя плотность нейтрального газа или эффективный перенос долгоживущих реактивных форм кислорода и азота (RONS) за счет усиления газового потока [113]. Перенос RONS на обрабатываемые образцы является ключевым элементом в обработке различных мишеней плазмой атмосферного давления, так как RONS играет важную физиологическую роль в защите от инфекционных агентов, функционировании ряда клеточных сигнальных путей и индукции митогенных ответов. Также приводит к разрушению поверхностных тонких слоев обрабатываемых материалов. В обработке семян агрокультур плазмой атмосферного давления, эти процессы непосредственно влияют на прорастание, изменение морфологических свойств, водопоглощаемость образцов.

Графики зависимости ускорения движения частиц по поверхности ДКПБР при включении плазмы для двух направлений (перпендикулярно электрическому полю и параллельно) приведены на рисунке 31.

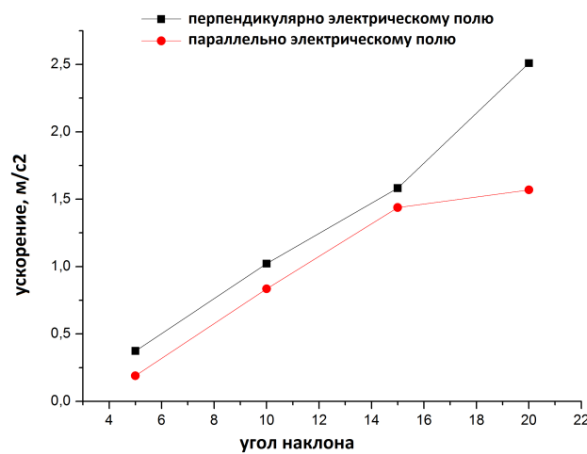
При попадании шара в плазму, наблюдаемая сила тянет шар к центру плазменного канала (рисунок 32). Отклонение шаров к краю плазменного канала приводит к колебаниям с периодом от 2 до 3 с остановкой в центре плазменного канала, что может говорить скорее о механизме электрического взаимодействия, чем о чисто механическом процессе.



а) графики зависимости ускорения движения частиц из пластика,



б) графики зависимости ускорения движения частиц из керамики,



в) графики зависимости ускорения движения частиц из нержавеющей стали

Рисунок 31 – Графики зависимости ускорения движения частиц по поверхности ДКПБР при включении плазмы для двух направлений: перпендикулярно электрическому полю и параллельно

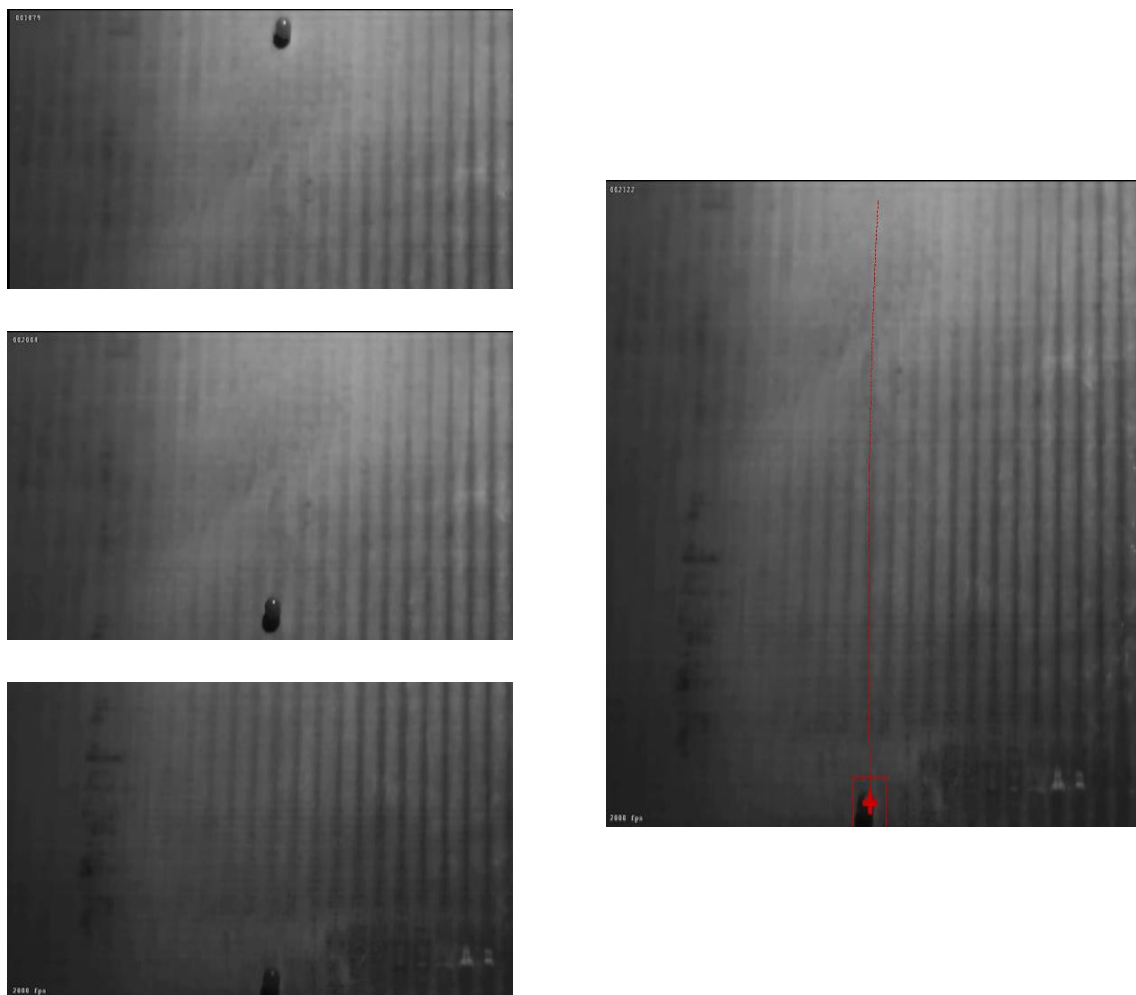


Рисунок 32 – Траектория движения частицы из стали (2 мм) при включении плазмы, угол наклона 10°

Другое явление связано с тем, что шар не сразу проникает в плазменный канал. Это наблюдалось в случае экспериментов с пластиковым шаром диаметром 2 мм с углом наклона поверхности ДКПБР 5° . Если шар находится между активными плазменными каналами, он испытывает отталкивающую силу, которая отталкивает шар от плазмы, возвращая его обратно к точке спуска.

Результаты экспериментов в ходе которых поверхность установки нагревалась до 60°C , что соответствует температуре поверхности установки при включении плазмы, совпали с результатами прокатки частиц по поверхности ДКПБР без включения плазмы, и это означает, что термальный эффект можно исключить.

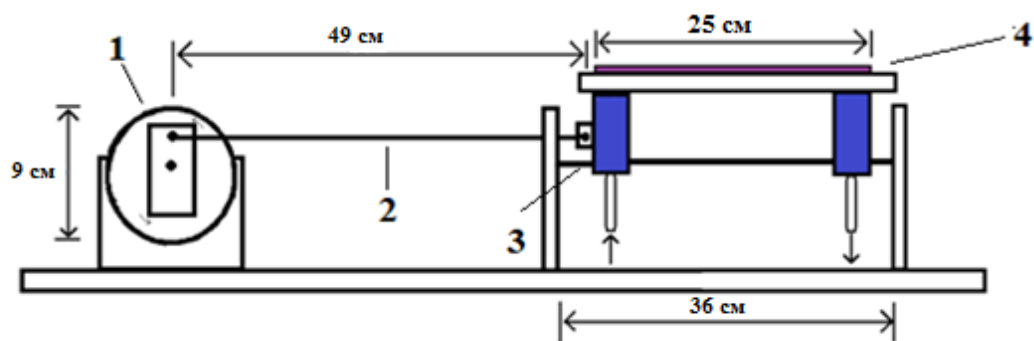
3 ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Среди мер, направленных на улучшение технологии возделывания пшеницы и способствовавших росту урожайности, было увеличение применения минеральных удобрений и химических средств защиты растений. Однако, подобные меры, а также механизация производства разрушают равновесие агроэкосистем и природную среду, что не может не оказывать негативного воздействия на плодородие почвы и качество получаемой продукции. Дальнейшая интенсификация возделывания сельскохозяйственных культур становится все более затратной и менее эффективной, обеспечивает все меньшие прибавки урожая и приводит к загрязнению окружающей среды [114]. В настоящее время возрастает роль физических методов предпосевной обработки семян, что обусловлено острой необходимостью получения экологически безопасной продукции и снижения пестицидной нагрузки [115]. На сегодняшний день из многочисленных видов физических методов предпосевной обработки семян учеными выделяется обработка семян агрокультур плазмой диэлектрического барьерного разряда, так как данный тип разряда обладает высокой биологической активностью плазмы и имеет температуру около 300 К, что дает возможность исключить термальный эффект при обработке плазмой данного разряда семян агрокультур.

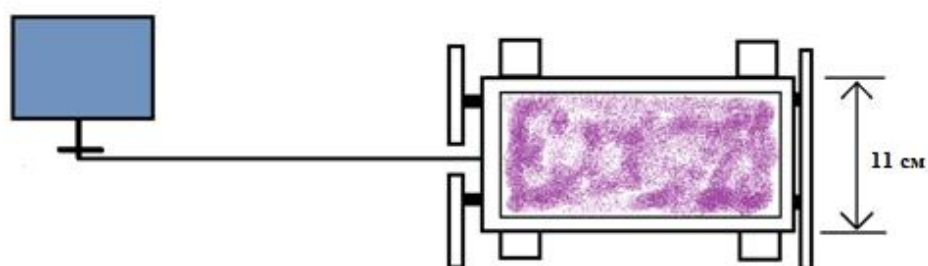
Несмотря на множество исследований и экспериментов, механизм стимулирующего действия физических факторов на эффективность прорастания семян пшеницы под воздействием плазмы атмосферного давления исследован недостаточно подробно [115, с. 36].

3.1 Исследование биологического отклика зерен пшеницы на воздействие плазмы барьерного разряда

С целью равномерной обработки зерновых культур плазмой поверхностного диэлектрического барьерного разряда была модернизирована установка на основе ДКПБР, а именно сообщено осциллирующее движение поверхности ДКПБР. Для этого был собран кривошипно-шатунный механизм, состоящий из двигателя, вращающего кривошипный вал (1), шатуна (2) и ползуна (3), на котором находится поверхность экспериментальной установки (4). Схема модернизированной установки показана ниже, на рисунке 33 [102, с. 15].



а)



б)

Рисунок 33 – Схематическое изображение осциллирующего механизма поверхности экспериментальной установки ДКПБР, а) вид сбоку, б) вид сверху

В следующей главе нами исследовано влияние обработки семян плазмой на всхожесть и основные биометрические показатели проростков зерна яровой мягкой пшеницы сорта Саратовская 29, урожая 2016 года [102, с. 26].

Проведен ряд экспериментов для измерения температуры поверхности экспериментальной установки. Данные измерения проводились с целью определения температуры при разных подаваемых мощностях, а также для исключения тепловых эффектов диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда при дальнейших исследованиях по обработке агрокультур и полимерных материалов. Температура поверхности измерялась с помощью пирометра UNIT UT 303С. Эксперименты проведены при различных мощностях от 200 Вт до 260 Вт, с шагом 20 Вт. Результаты измерений показали, что с увеличением мощности температура возрастает, при мощности 200 Вт температура поверхности равна 58⁰С, а при максимальной мощности 260 Вт температура достигла 63⁰С (таблица 7). В таком случае можно предположить, что при дальнейших исследованиях по обработке полимеров и сельскохозяйственных культур тепловые эффекты при данном диапазоне мощностей можно исключить [102, с. 26; 116].

Таблица 7 – Значения температур, измеренных при разных мощностях

| | | | | |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| P, Вт | 200 | 220 | 240 | 260 |
| <T>, °C | 58 | 60 | 62 | 63 |

В качестве растительного материала использовали семена пшеницы "Саратовская - 29" (*Triticum aestivum*). Зерна пшеницы были получены из Института сельского хозяйства и растениеводства Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан и хранились при температуре 4 °C. Семена пшеницы визуально проверяли перед началом экспериментов, и зерна без видимых дефектов отбирали для обработки плазмой [117].

Семена пшеницы подвергали воздействию плазмы в течение 5, 10, 15 с, 30 и 60 с при мощности плазмы 260 Вт. Каждая обработка повторялась три раза. Контрольный вариант (необработанный) и каждый вид обработки тестировали на трех чашках Петри по 50 семян на чашку. Зерна пшеницы стерилизовали перед посевом в растворе 1% гипохлорита натрия в течение 10 мин. Затем их несколько раз промывали в стерилизованной воде. После этого их помещали в чашки Петри с 3-4 слоями бумаги (Whatman № 1), смоченной дистиллированной водой. Зерна равномерно распределяли по чашке Петри, при этом отдельные зерна не касались друг друга [118].

Проращивание семян проводили в течение 1, 4 или 9 дней при фотопериоде 15 ч света (день) и 9 ч (ночь) при 22°C. Количество радикальных выступов на 1 день после посева регистрировали в качестве критерия всхожести. Процент прорастания рассчитывали на 4-й и 9-й день. Количество нормальных проростков подсчитывали на 4 и 9 день после проращивания согласно Международной ассоциации тестирования семян (ISTA) [119]. Число нормальных проростков, зарегистрированное первым, представляет популяцию быстро прорастающих семян и может быть использовано в качестве индекса энергичности [120,121].

Массу проростков, длину побега и корня определяли на 4-й день выращивания. Характеристики всхожести рассчитывались по следующим формулам [50, с. 1113]:

$$\text{Потенциал прорастания (\%)} = \frac{\text{Количество семян, проросших за 1 день}}{\text{Общее количество семян}} \times 100\%, \quad (17)$$

$$\text{Процент всхожести (\%)} = \frac{\text{Количество нормальных всходов п 4 или 9 дней}}{\text{Количество семян, заложенных для проращивания}} \times 100\%. \quad (18)$$

Массу проростков, показатели длины надземной части и корня определяли на 4-е сутки после начала проращивания при температуре +22 °C в сравнении с контрольным вариантом без обработки. Достоверность результатов оценивали с помощью t-критерия Стьюдента [115, с. 37].

Одним из перспективных направлений фундаментальных и прикладных исследований является изучение регуляции роста и развития растений с помощью физических методов. При этом очевидно, что главное внимание следует обратить на первые этапы онтогенеза растений, начиная с прорастания семян и роста проростков, когда происходят наиболее заметные, существенные и принципиальные изменения в растениях [102, с. 25].

Влияние обработки плазмой на прорастание семян наблюдалось через 1, 4, 9 дней. Потенциал прорастания у семян пшеницы, обработанных в течение 5, 10 и 15 с, составлял 100, 96 и 98% после 1 дня имбибиции, соответственно (рисунок 34). Значительная разница наблюдалась между обработанной и контрольной группами (7-17%) ($p < 0,05$). Однако не наблюдалось больших различий между результатами, полученными при обработке плазмой в течение 5, 10 и 15 с. Обработка зерен пшеницы в течение 30 с и более приводила к значительному снижению всхожести семян [118, с. 335].

Дисперсионный анализ (ANOVA) - это метод статистической обработки, направленный на поиск зависимостей в экспериментальных данных путем изучения значимости различий в средних значениях. Односторонний ANOVA сравнивает средние между интересующими группами и определяет, отличаются ли какие-либо из этих средних статистически значимо друг от друга. В частности, проверяется нулевая гипотеза:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k, \quad (19)$$

где μ - среднее по группе, k - количество групп. Если односторонний ANOVA дает статистически значимый результат, мы принимаем альтернативную гипотезу (H_A), которая означает, что есть по крайней мере два групповых средних, которые статистически значимо отличаются друг от друга. Тесты *post hoc* являются неотъемлемой частью ANOVA. Когда используется ANOVA для проверки равенства по крайней мере трех групповых средних, статистически значимые результаты указывают на то, что не все групповые средние равны. Однако результаты дисперсионного анализа не позволяют определить, какие различия между парами средних являются значимыми. Для изучения различий между средними для нескольких групп при контроле уровня ошибок в эксперименте используются *Post hoc* тесты.

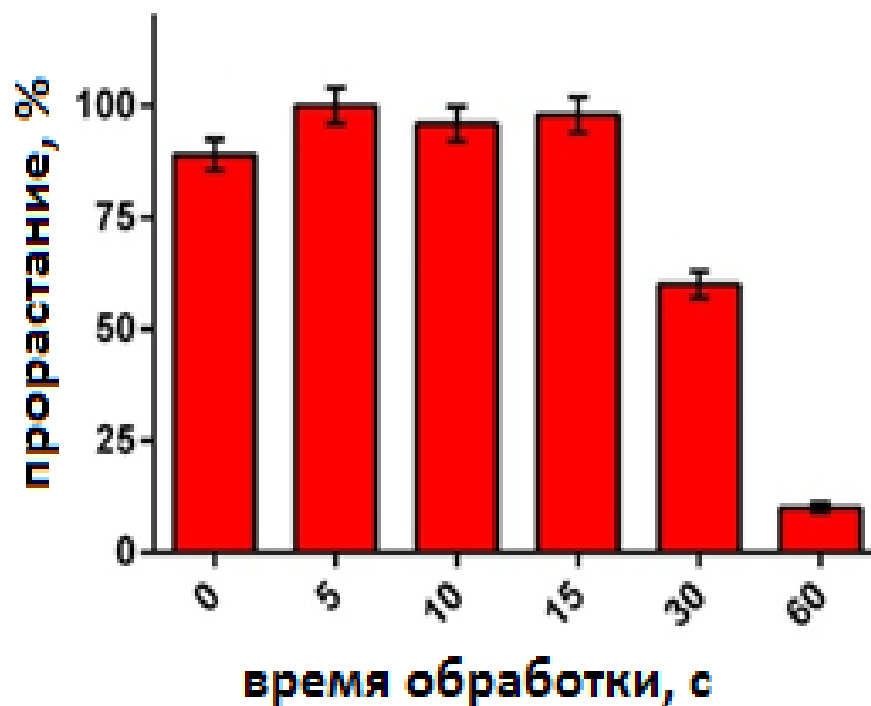


Рисунок 34 – Зависимость прорастания семян пшеницы от времени обработки плазмой. Столбики представляют среднее из трех биологических реплик, для каждого столбика разные строчные буквы указывают на значительные различия ($p \leq 0,05$) между обработкой плазмой в пять различных временных интервалов (5, 10, 15, 30, 60 с), как было определено с помощью ANOVA с последующим Post hoc тестом Тьюки

Хотя потенциал прорастания у необработанных семян составлял 89%, но всхожесть семян через 4 дня снизилась (таблица 8). При этом всхожесть семян, обработанных в течение 5, 10 и 15 с, была значительно выше по сравнению с необработанными семенами пшеницы после 4 дня имбибиции, в то время как общий процент всхожести через 9 дней не имел существенной разницы между группами [122]. Можно было бы ожидать, что если наблюдать за прорастанием обработанных плазмой и контрольных образцов в течение более длительного периода, то эффект от обработки плазмой будет более значительным. Однако есть веские причины проращивать семена как можно быстрее, чтобы избежать длительных испытаний на прорастание. При длительном проращивании используется дорогостоящее оборудование для выращивания, что может привести к задержке результатов и повышению риска загрязнения тестов микроорганизмами [118, с. 336].

Таблица 8 – Процентное соотношение потенциала и скорости прорастания семян после плазменной обработки

| | Количество семян | Потенциал прорастания (%) | | Скорость прорастания (%) | | | |
|----------------------|------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------|--------------------|
| | | | | 4-ый день | | 9-ый день | |
| Контрольный | 50 | 44 | 89±3 ^a | 33 | 66±4 ^a | 42 | 84±3 ^a |
| Обработанные плазмой | | | | | | | |
| 5 с | 50 | 50 | 100±3 ^b | 50 | 100±3 ^b | 50 | 100±3 ^b |
| 10 с | 50 | 48 | 96±2 ^b | 42 | 84±4 ^c | 47 | 94±4 ^{ab} |
| 15 с | 50 | 49 | 98±2 ^b | 48 | 96±3 ^{cb} | 49 | 98±2 ^b |

Результаты биометрического анализа проростков представлены на рисунке 35. Столбики представляют среднее ± SD из трех биологических реплик. Для каждого столбика разные строчные буквы указывают на значительные различия ($p \leq 0,05$) между обработками (5, 10, 15 с), как было определено с помощью ANOVA с последующим *post hoc* тестом Тьюки. Данные показывают, что обработанные плазмой проростки пшеницы имели массу примерно на 15-18% больше, чем необработанные растения. Более того, увеличение биомассы побегов растений пшеницы составило от 22% до 44%, а масса корня увеличилась от 60% до 80% на 1 растение. Следует отметить, что растения, обработанные в течение 15 с, показали лучшие результаты по сравнению с остальными образцами. Для определения влияния плазмы на проростки также измеряли длину корней и первичного листа (побега) через 4 дня [118, с. 337].

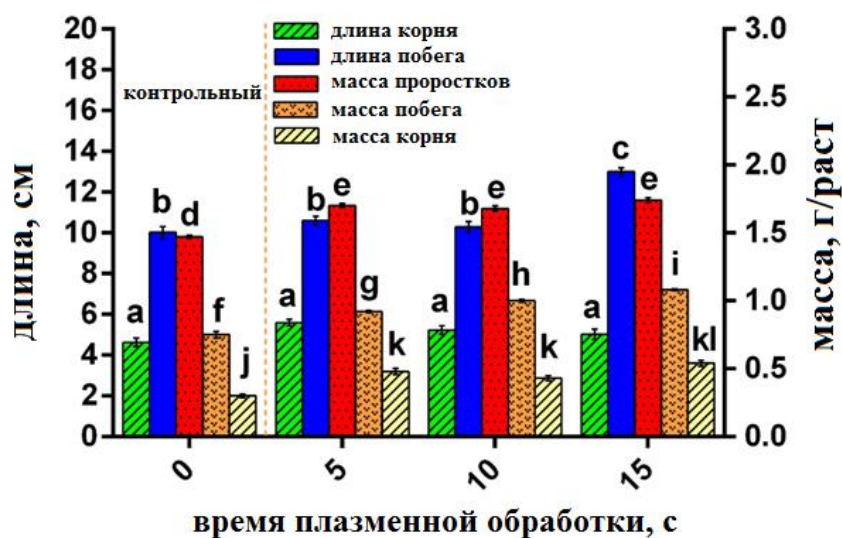


Рисунок 35 – Длина и масса корней и побегов проростков при различном времени обработки низкотемпературной плазмой, измеренные через 4 дня после прорастания

Максимальная длина побегов и корней (13 см) соответствует 15 с плазменной обработки. После обработки семян в течение 5 и 10 с длина побегов и корней составила 10,6 и 10,29 см соответственно.

Полученные результаты подтверждают, что плазма оказывает положительное влияние на прорастание пшеницы. Процент прорастания зерна и параметры роста были значительно выше у семян, обработанных плазмой. Однако эффект зависит от времени воздействия плазмы. 15-секундная обработка плазмой вызвала наибольший стимулирующий эффект на всхожесть и биометрические параметры проростков пшеницы [118, с. 335].

Морфология поверхности семян пшеницы до и после обработки плазмой ДКПБР была изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). Для этого был использован электронный микроскоп, позволяющий получать увеличенное изображение поверхности, благодаря использованию электронных пучков с большой энергией [115, с. 35].

Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Quanta 3D 200i с приставкой для рентгеноспектрального анализа от EDAX. Данный исследовательский комплекс является инструментом, предназначенным для изучения морфологии материалов с высоким пространственным разрешением, получения информации о составе и других свойствах, также для проведения анализа отказов. Основная информация об устройстве сканирующего электронного микроскопа, формировании электронного пучка, взаимодействии электронов с веществом, генерации вторичных сигналов, а также построении и анализе изображении подробно изложены в инструкциях по эксплуатации [115, с. 35].

Проведение количественного анализа возможно лишь при соблюдении следующих условий: образец должен быть гладким и полированным, гомогенным (в области анализа), толще, чем область возбуждения рентгеновского излучения. Также необходимо, чтобы образец был проводящим, либо с напылением тонкого токопроводящего слоя [115, с. 35].

Также для изучения морфологических свойств семян пшеницы до/после обработки плазмой ДКПБР был использован метод измерения контактного угла, так как контактный угол смачивания является количественной характеристикой процесса смачивания, его величина определяет межмолекулярное взаимодействие частиц поверхности твердых тел с жидкостями. Для определения угла смачивания капли воды на поверхности семян пшеницы при разных временах обработки 1 мкл капли обычной воды была нанесена на поверхность зерна с помощью микропипетки при комнатных условиях. Далее, сразу же после нанесения капли с помощью фотокамеры фиксировалась изображения при положении строго перпендикулярной на поверхность сечения [115, с. 36].

Проведена серия экспериментов по изучению морфологических свойств, а именно, смачиваемости семян пшеницы, обработанных плазмой ДКПБР. Образцы обрабатывались в течение 5, 10, 15, 30 секунд, 1 и 3 минут, мощность составляла 260 Вт. Результаты измерения контактного угла смачиваемости

образцов были следующими: контактный угол смачиваемости контрольного образца 70° , при 5 с облучения угол смачиваемости снизился до 68° , при 10 с облучения до 43° , при 15 с облучения до 54° , при 30 с облучения до 48° , при 1 мин облучения до 30° , при 3 мин облучения до 0° . Как видно из этих результатов, после обработки плазмой ДКПБР смачиваемость данных образцов стала выше, что способствует дальнейшей всхожести семян. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других исследований. Ниже, на рисунке 36, показаны фоторисунки измерения контактного угла смачиваемости капли воды на поверхности семян пшеницы, обработанных плазмой ДКПБР. В таблице 9 приведены численные значения измеренных контактных углов в зависимости от времен обработки плазмой при мощности источника плазмы 260 Вт [115, с. 36].

Таблица 9 – Результаты измерения контактного угла смачиваемости образцов

| Время облучения | Контрольный | 5 с | 10 с | 15 с | 30 с | 1 мин | 3 мин |
|---------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| Контактный угол, $^\circ$ | 70° | 68° | 43° | 54° | 48° | 30° | 0° |

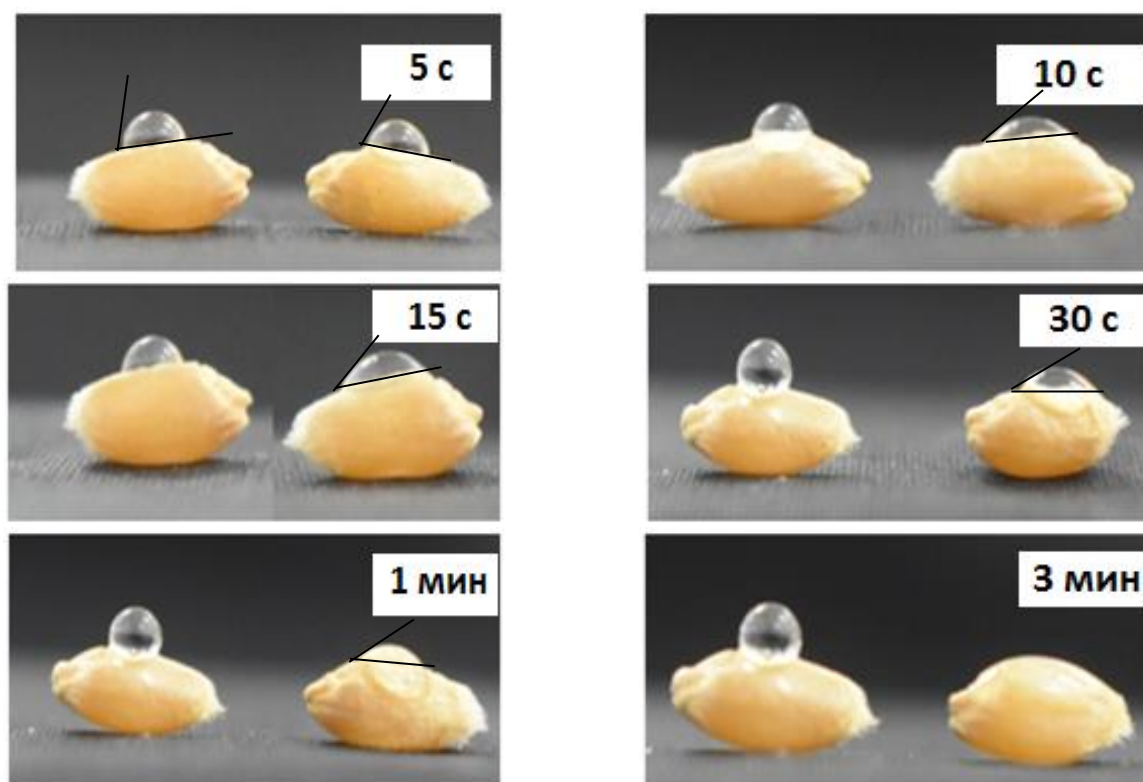


Рисунок 36 – Фоторисунки измерения контактного угла смачиваемости семян пшеницы, обработанных плазмой ДКПБР, слева – контрольный, справа – обработанный образцы

Смачиваемость семян пшеницы в зависимости от времени обработкой плазмой ДКПБР при мощности 260 Вт в зависимости от времени приведена на рисунке 37.

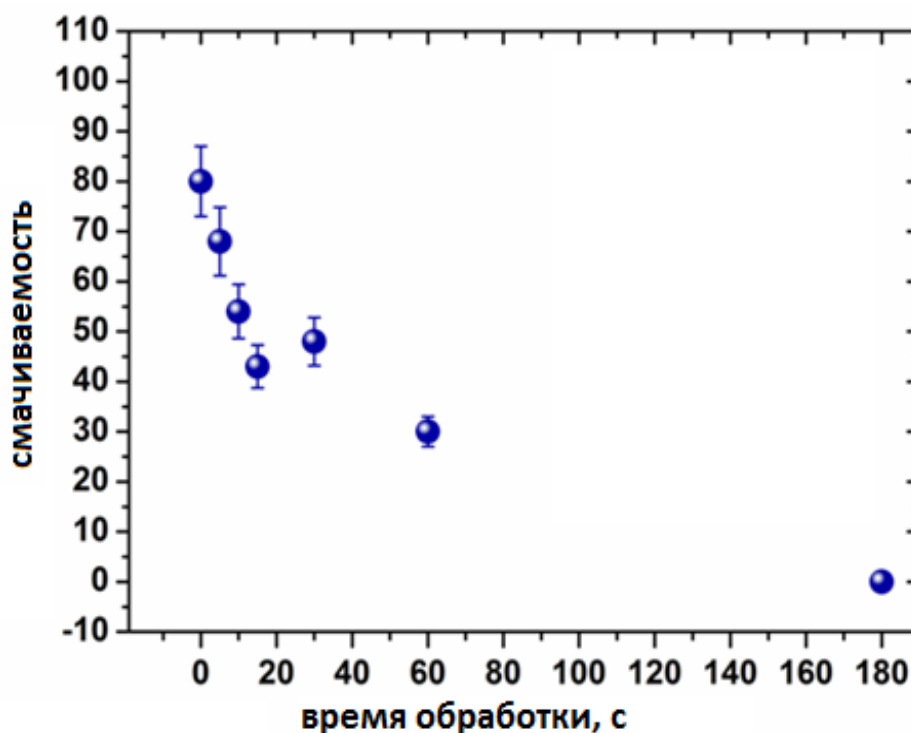
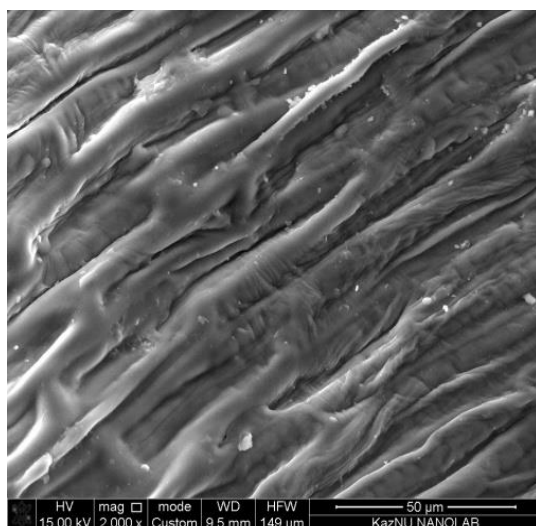
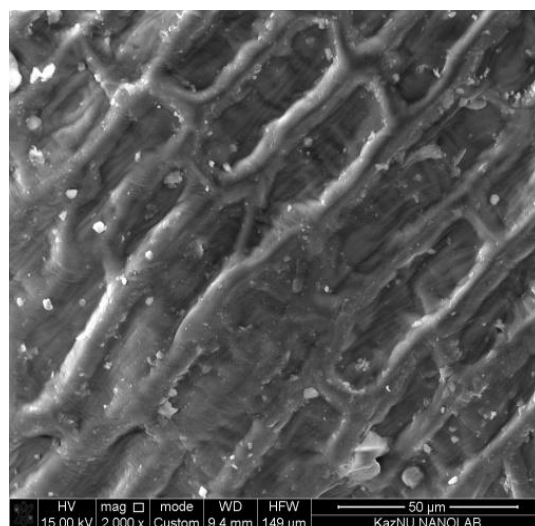


Рисунок 37 – Смачиваемость семян пшеницы в зависимости от времени обработкой плазмой ДКПБР, мощность 260 Вт

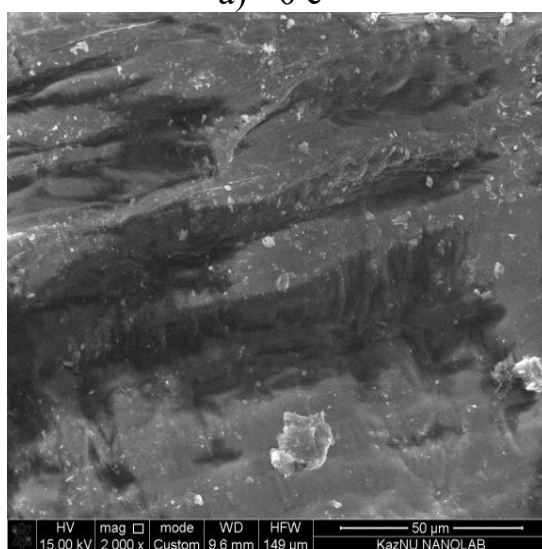
Морфология поверхности семян пшеницы после обработки плазмой ДКПБР также изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). Семена пшеницы обработаны плазмой DCSBD в течение 15 секунд, обработанные семена сравнивали с необработанными образцами. Как показывают результаты, особо заметных структурных повреждений не наблюдается (рисунок 38) [115, с. 36].



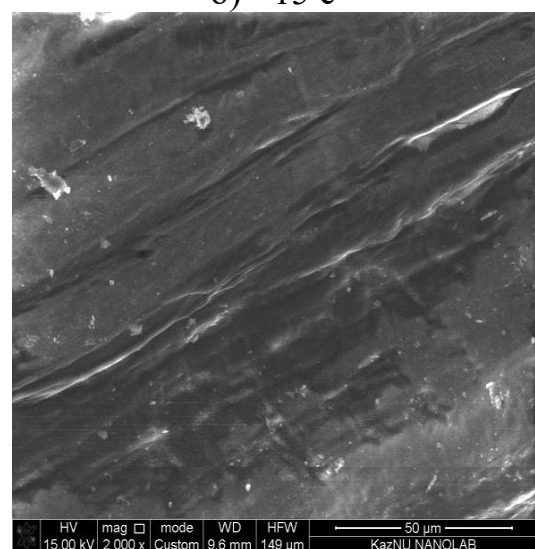
а) - 0 с



б) - 15 с



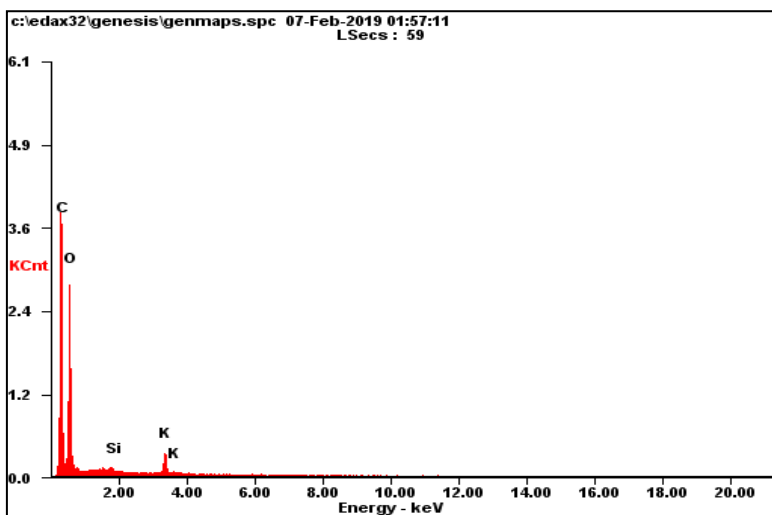
в) 30 с



г) 1 мин

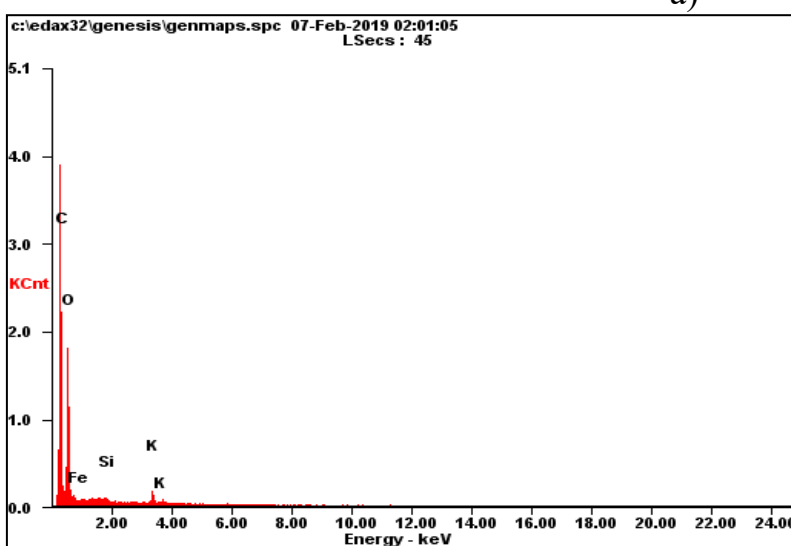
Рисунок 38 – Поверхностная морфология образцов семян пшеницы, а) необработанный, б) обработанный плазмой в течение 15 с, в) обработанный плазмой в течение 30 с, г) обработанный плазмой в течение 1 мин

Методом рентгеноспектрального микроанализа изучены поверхностный элементный состав семян пшеницы до и после обработки низкотемпературной плазмой атмосферного давления. Ниже, на рисунке 39, приведены результаты анализа [115, с. 36].



| Элемент | Wt% | At% |
|---------------|-------------|-------|
| <i>CK</i> | 56.79 | 64.70 |
| <i>OK</i> | 39.85 | 34.08 |
| <i>SiK</i> | 0.29 | 0.14 |
| <i>KK</i> | 3.07 | 1.08 |
| <i>Matrix</i> | Correct ion | ZAF |

а)



| Элемент | Wt% | At% |
|---------------|-------------|-------|
| <i>CK</i> | 58.45 | 67.80 |
| <i>OK</i> | 34.77 | 30.28 |
| <i>FeL</i> | 4.96 | 1.24 |
| <i>SiK</i> | 0.25 | 0.13 |
| <i>KK</i> | 1.57 | 0.56 |
| <i>Matrix</i> | Correct ion | ZAF |

б)

Рисунок 39 – Элементный анализ поверхности семян до (а) и после (б) обработки (15 с) плазмой атмосферного давления

Результаты элементного анализа показывают, что заметных изменений в соответствующем составе зерен после обработки не имеется. Видно наличие пиков углерода и кислорода, которые являются основными показателями органической природы веществ. Также наблюдаются пики кремния (Si) и калия (K). Более длительная обработка плазмой диэлектрического барьерного разряда до 3 мин при мощности генератора 260 Вт также не выявила значительных изменений в элементном составе [115, с. 37].

Активность α -амилазы определяли с использованием растворимого крахмала в качестве субстрата и путем измерения количества редуцирующих сахаров методом ДНС (3,5-динитросалициловая кислота) с использованием D-глюкозы в качестве стандарта. Для анализа 0.5 мл гомогената растений в качестве источника фермента перемешали с равным объемом 0.15% крахмала в

0,1М натрий ацетатном буфере (рН6) и в течение 30 мин при 60°C. После инкубации реакцию остановили добавлением 3 мл реагента DNS и кипячением в течение 15 минут. За единицу активности принимали количество фермента, которое образует 1мкМ восстанавливающих сахаров за 1 мин в расчете на 1 мг тотального белка, при данных условиях реакции [115, с. 37].

Также, дополнительно проведен электрофоретический анализ альфа амилазы. Предварительно зерно, предназначенное для электрофоретического анализа альфа амилазы, обеззараживали раствором $KMnO_4$, нагретым до 75° С в течение 30 секунд, промывали дистиллированной водой и ставили проращивать на фильтрах смоченных водой в темное место при температуре 20°C в течение 4-5 суток. За время проращивания длина проростка достигала в среднем 40 мм [115, с. 37].

Для экстракции фермента, после удаления проростка и корней, зерновку помещали в пробирку, после чего заливали 0,2% двууглекислой соды ($NaHCO_3$), содержащем 20% сахарозы и 0,03% бромфенола синего. После тщательного измельчения каждой зерновки в отдельных пробирках с помощью палочки из нержавеющей стали, проводили центрифугирование при 5 000 об/мин. в течение 10 мин. Затем осуществляли перегрев закрытых пробирок с супернатаном при температуре 80 С в течение 20-25 минут. Подготовленную надосадочную жидкость наносили в стартовые ячейки по 2-3 мкл [115, с. 37].

Электрофорез проводили на пластинах 7,5%-го полиакриламидного геля размером 190x105x1 мм на приборах, изготовленных в Селекционно-генетическом институте УААН (Одесса). Электрофоретическое разделение проводили в триглициновой системе; рН 8,46 движение ферментов от катода к аноду при напряжении 300 В. Длительность электрофореза соответствовала времени прохождения 2,5 меток бромфенолового синего через гель, около, 2,5 часов. В состав 1 литра электродного буфера входит 1,2 г триса и 5 г. глицина [115, с. 37].

После электрофореза инкубация алфа амилазы проводилась в течение 30 минут при комнатной температуре в 1% - ном растворе гидролизованного крахмала, приготовленном в 0,1 М ацетатного буфера. Для более равномерного проникновения крахмала гель необходимо переворачивать [115, с. 37].

Ацетатный буфер содержит 2,7 г. уксусного натрия: 50,3 мл 0,2 М уксусной кислоты и доводится водой до 300 мл. В этот раствор добавлялось 5г . гидролизованного картофельного крахмала. При постоянном перемешивании данная взвесь доводилась до кипения [115, с. 38].

После инкубации гелевые пластины промывали проточной водой и окрашивали раствором йода в йодистом калии.

Красящий состав включал:

1) Калий йод - 2,5 г; 2) Кристаллический йод - 1,3 г; 3) Трихлоруксукная кислота (ТХУ) - 25,2 г. (или 42 мл 60% ТХУ) 4) Вода - до 500 мл [115, с. 38].

Гелевые пластины под действием красящей смеси приобретали темно - фиолетовую окраску. Места локализации амилаз не окрашиваются. Влияние плазмы на всхожесть семян пшеницы варьировалась в зависимости от

продолжительности обработки. Всхожесть зерна при воздействии на зерна пшеницы в течение 5, 10 и 15 секунд составила 100, 96 и 98% соответственно. Значительное достоверное различие наблюдалось между обработанными и контрольными вариантами (7-12%) ($p < 0.05$). При этом, не наблюдались значительные различия между результатами, полученными при обработке плазмой в течение 5, 10 и 15 секунд. Настоящее исследование показало, что плазма оказывает положительное влияние на прорастание зерна пшеницы. Всхожесть зерна и биометрические показатели оказались значительно выше при обработке плазмой. При этом эффективность зависела от продолжительности действия плазмы. Обработка зерна в течение 15 секунд вызвала наибольший стимулирующий эффект на всхожесть и биометрические показатели проростка пшеницы. Процесс обработки плазмой возможно обеспечивает поглощение воды и активирует ферментативные и другие биологические реакции в растительной клетке, что приводит к более быстрому и равномерному прорастанию [102, с. 25; 115, с. 37].

Известно, что прорастание семян является одним из важных этапов в жизни растения. На самых ранних этапах жизни, пока не исчерпаны запасы зерновки, у растений преобладает гетеротрофное питание. С формированием тканей и новых органов растение постепенно переходит от гетеротрофного в автотрофное питание, что сопровождается перестройкой ферментных систем и механизмов обмена. Сбои в молекулярной сигнализации во время прорастания зерна могут стать причиной не только пониженной продуктивности сеянца, но и значительных потерь урожая в предуборочный период. И наоборот, длительное пребывание в состоянии покоя приводит к неспособности зерна прорасти в оптимальное для него время года и, соответственно, к затруднению успешной фиксации проростка на субстрате [115, с. 38].

Для количественного анализа активности α -амилазы были выбраны зерна пшеницы, обработанные плазмой 5, 10 и 15 с (рис. 41(a) и (b)). Неочищенный экстракт из 1-3-дневных проростков пшеницы подвергали нативному ПААГ и окрашивали на активность α -амилазы. Полоса 1 – 3-дневные проростки необработанных семян пшеницы; полоса 2 – 3-дневные проростки обработанных плазмой в течение 5 с семян пшеницы; полоса 3 – в течение 10 с; полоса 4 – в течение 15 с соответственно [11, с. 75]. Одна единица активности α -амилазы определялась как количество фермента, необходимое для образования редуцирующего сахара, эквивалентного 1 мкмоль глюкозы в минуту из растворимого крахмала при 30 °С и рН 6 в 1 мл фермента. Все приведенные данные отражают среднее значение трех биологических реплик ($n = 3$). Значения с разными буквами в каждой обработке представляют значительную разницу $p \leq 0,05$. Для контрольных образцов активность α -амилазы незначительно увеличилась до 0,6, 0,67 и 0,7 мМЕ - мг⁻¹ белка для 1-, 2- и 3-дневных проростков, соответственно. Для зерен пшеницы, обработанных плазмой в течение 5, 10 и 15 с, наблюдалось значительное увеличение активности α -амилазы по сравнению с контролем. Также высокая активность α -

амилазы зафиксирована при обработке плазмой в течение 15 с после 3 дней прорастания (рисунок 40(a)) [118, с. 336].

Пшеничная α -амилаза отличается высоким полиморфизмом и представлена двумя основными группами: α -амилаза I и α -амилаза II. Изоферменты этих двух групп ферментов различаются по степени сродства к катионам кальция, чувствительности к рН и температурной стабильности [123]. С целью изучения вклада изоферментов α -амилазы в наблюдаемое увеличение ферментативной активности, проанализированы влияние плазмы на активность двух групп изоформ α -амилазы пшеницы (рис. 40 (b)). Электрофоретический анализ показал, что увеличение активности связано с активацией обеих групп изоферментов AMY1 и AMY2 (рисунок 40 (б), полосы 2-4) [118, с. 336].

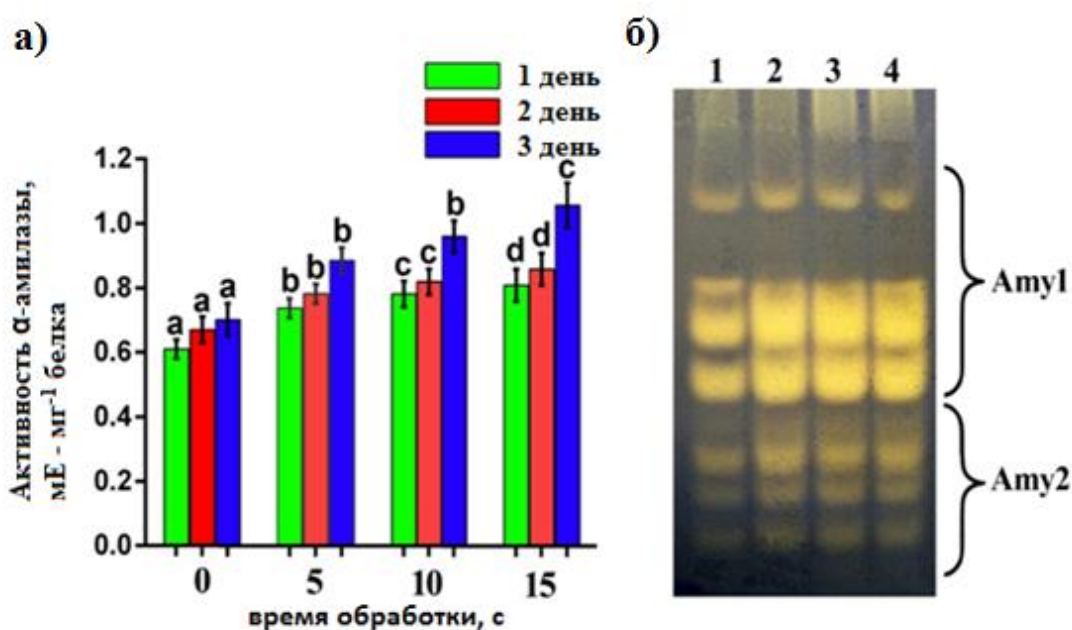


Рисунок 40 – Временной ход активности α -амилазы в обработанных плазмой семенах пшеницы по сравнению с контролем, а) активность α -амилазы была определена количественно путем обнаружения восстанавливающих сахаров на основе динитросалицилата; б) окрашивание активности α -амилазы

Благодаря проникновению активных частиц плазмы и RONS, обработка семян плазмой атмосферного давления может вызвать цепь биохимических реакций внутри семян и соответствующий ответ клеток семян. Одним из важных возможных эффектов является улучшение реакции на окислительный стресс после обработки плазмой. Это может привести к изменению активности антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза (СОД), каталаза (КАТ), пероксидаза (ПОД) и др. Ли и др. [52, с. 1623] сообщают, что плазменная обработка семян пшеницы в объеме ДБР приводит к появлению микротрещин на поверхности семян и значительному увеличению активности СОД и ПОД на проростках после 4 и 7 мин плазменной обработки. Рахман и др. [124] сообщают, что обработка семян пшеницы в ДБР при низком давлении в плазме Ar/O₂ показала значительное увеличение активности в СОД, в то время

как активность КАТ не изменилась. Увеличение активности антиоксидантных ферментов после обработки плазмой было обнаружено и у других видов семян [125]. Например, Хоссейни и др. [14, с. 013525] обнаружили, что обработка семян *Sunara scolymus* L. в течение 15 мин азотной плазмой РФ привела к увеличению КАТ и ПОД в семенах и корнях. Активность СОД и КАТ в обработанных ДКПБР корнях семян кукурузы также изучалась Хенсоловой и др. [126] после нескольких дней проращивания: был сделан вывод, что при обработке образцов в течение 60 с активность СОД увеличивается, а КАТ подавляется [118].

Помимо антиоксидантных ферментов, значительную роль в прорастании играют ферменты гидролиза крахмала. Крахмал является основным компонентом эндосперма злаков и служит главным источником энергии во время прорастания и роста растений. Превращение крахмала в растворимые сахара - сложный процесс, в котором участвуют многие ферменты, в том числе α -амилаза, которая является важным ключевым ферментом [127]. Наши результаты показывают, что обработка плазмой значительно повышает активность α -амилазы в проростках зерна пшеницы (рис. 41), что согласуется с данными Guo et al. [32, с. 126] и Ji et al. [128,129]. Guo et al. [32, с. 126] показали, что после обработки плазмой в течение 4 мин в объемном ДБР наблюдаются трещины в оболочках семян, увеличивается количество растворимых белков и активность α -амилазы в 4-дневных проростках. В нескольких работах Джи и др. [128,129] исследовалась активность α -амилазы и содержание гормона гибберелловой кислоты (ГК) непосредственно в семенах шпината после обработки плазмой импульсного наносекундного разряда. После 24 ч проращивания наблюдалось значительное увеличение содержания ГК и активности α -амилазы [118, с. 33].

Как упоминалось во второй главе, результаты оптико-эмиссионной спектроскопии указывают на наличие следующих реактивных форм кислорода и азота (RONS) в плазме диэлектрического барьерного разряда: H_2O_2 , O_2^- , NO. Предположительный механизм влияния RONS на прорастание семян выглядит следующим образом [130]:

RONS (H_2O_2 , O_2^- , NO) \rightarrow ГК \uparrow \rightarrow α -амилаза \uparrow \rightarrow превращение крахмала в растворимый сахар.

Схематическое изображение нескольких предполагаемых механизмов активации α -амилазы под воздействием плазменной обработки и химии RONS показано на рисунке 41 [118, с. 33].

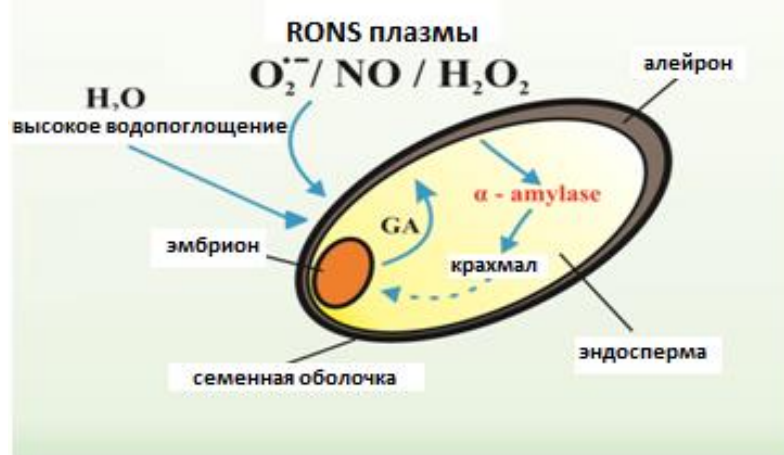


Рисунок 41 – Схема путей усиления активации α -амилазы в обработанных плазмой семенах пшеницы

Синтез гидролитических ферментов, включая α -амилазу, строго регулируется гормонами. ГК стимулирует синтез α -амилазы и способствует прорастанию, а абсцизовая кислота (АВА) блокирует действие ГК и отвечает за спячку семян [131]. Известно, что синтез ГК усиливается при увеличении поглощения воды семенами. Поэтому в результате плазменной обработки увеличение гидрофильности поверхности семян и последующее увеличение поглощения воды может в конечном итоге привести к интенсивному синтезу ГК, что в свою очередь повышает активность α -амилазы. Однако положительное влияние высокой смачиваемости поверхности семян преобладает при времени обработки до 15 с, а дальнейшее увеличение времени обработки подавляет это влияние из-за высокой концентрации накопленных RONS. Это приводит к снижению всхожести семян [118, с. 34].

Синтез α -амилазы также регулируется кислородными радикалами, которые, как известно, являются сигнальными молекулами, активирующими процессы в растительных клетках. Было показано, что в зернах ячменя генерация H_2O_2 (перекиси водорода) через супероксидный радикал, производимый NADPH-оксидазами, способствует усиленному биосинтезу ГА в зародышах. Как упоминалось выше, ГК оказывает прямое влияние на синтез α -амилазы в алейроновых клетках зерна ячменя [132]. Следовательно, кислородные радикалы, образующиеся после обработки плазмой, участвуют в регуляции синтеза фитогормона гиббереллинов и синтеза α -амилазы в зернах пшеницы, следовательно, усиливают прорастание и рост проростков [118, с. 34].

3.2 Исследование обработанных плазмой барьерного разряда семян на заражение бактериями и микроскопическими грибами

Интерес к применению плазмы атмосферного давления в медицине и хирургии увеличивается с каждым днем. Стерилизация плазмы и взаимодействие плазмы с микроорганизмами являются двумя наиболее интересными и продолжающимися областями исследований холодной плазмы. Несколько методов традиционной стерилизации уже хорошо известны, такие как автоклавирование, окись этилена, УФ-стерилизация, облучение. К данному списку также можно добавить новую технологию плазменной стерилизации. Плазма может убить почти все виды бактерий, так как разные виды ионов и реактивных веществ, таких как атомы кислорода и озона могут быть сгенерированы во время обработки газовыми разрядами. Поскольку низкотемпературная плазма атмосферного давления является приемлемым для обработки поверхности образцов до 70 °С, то есть возможность обработки также семян растений без разрушающего эффекта [115, с. 38].

Для определения эффективности режима обеззараживания холодной плазмой микробиологический анализ зерна проводился в соответствии с ГОСТами [133,134] и литературными данными [135,136]:

- общего количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (МАФАиМ);
- бактерий картофельной палочки;
- количества плесневых грибов.

Метод определения общего количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов основывался на:

- высеве разведений определенного количества продукта в агаризованную питательную среду;
- культивировании посевов в аэробных условиях при температуре (30°С в течение 72 часов;
- подсчете всех мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и пересчете их количества на 1 г продукта. В качестве питательной среды использовался мясо-пептонный агар, сусло агар, питательная среда Чапека и Сабуро [136], [115, с. 38].

Идентификация бактерий изучается по морфологическим и физиолого-биохимическим признакам. Морфология бактерий исследуется с использованием микроскопа ВМ-ЕХ20 с разрешением увеличения $\times 100-200$. Окраска по Граму и подвижность бактерий рассчитываются по методикам, описанным в [135, с. 350]. Физиолого-биохимические свойства определяют по способности бактерий использовать разные источники углерода: спирты, органические кислоты, аминокислоты (как донор электронов и источник углерода). Органические кислоты и спирты вносят в концентрациях 3,5 г/л, аминокислоты – 2 г/л в среду Постгейта «С» без дрожжевого экстракта. В качестве акцепторов электронов в среду Постгейта «В» вносят в концентрации 4,5 г/л сульфат, сульфит, тиосульфат, элементную серу. Способность микроорганизмов к спорообразованию проверяют, прогревая суспензии клеток

в запаянных ампулах на водяной бане при 80 °С в течении 10, 20,30 мин [115, с. 38; 135, с. 351].

Известно, что около 80 плесневых грибов, образуют микотоксины, из них 8 видов грибы рода *Fusarium*, 17 видов *Aspergillus* и четыре — *Penicillium*. Основные яды, вырабатываемые плесенями — шесть типов афлатоксинов, патулин, охратоксины и рубратоксины – эти токсины являются опасными для человека и животных [115, с. 39; 136, с. 45].

Заражённость зерна грибами рода *Fusarium* вызывает значительное снижение урожая и ухудшает качество продукции. Это заболевание зерновых культур называется фузариозом зерна. Фузариозное зерно появляется в результате заражения грибами *F.graminearum*, *F.culmorum*, *F.avenaceum*, *F.sporotrichioides*, *F. poae* и т.д., существуют образцы с типичными признаками заражения и несущие внутреннюю инфекцию, а также без видимых симптомов поражения [137]. Бактерии рода *Bacillus sp.* являющиеся причиной возникновения картофельной болезни хлеба известны как условно-патогенные бактерии, которые вызывают пищевые токсико инфекции. Эти бактерии встречаются в составе микофлоры почв, откуда потом попадают в зерно, а, следовательно, в дальнейшем заражают муку и при приеме хлеба в пищу вызывают серьезные заболевания человека (менингиты, эндокардиты, артриты, эндофтальмиты, септицемии, остеомиелиты и др.) [118, с. 335]. В связи с этим, поиск и применение менее энергоемких и экологически безопасных для человека способов обеззараживания зерен, муки и продлевающих сроков хранения хлебобулочных изделий, очень актуальная проблема, требующая своего решения [115, с. 38].

Предварительно 20 г семян пшеницы стерилизовали автоклавированием при 126 °С в течение 15 мин. Затем поверхность семенных зерен искусственно заражали 21-дневными нитчатыми грибами *Aspergillus spp.* и *Penicillium spp.* Зараженные семена пшеницы помещали в стерильные чашки Петри, вода испарялась и адсорбировалась на поверхности семян во время заражения. Через 24 ч 20 г инфицированных семян пшеницы подвергали воздействию холодной плазмы ДКПБР для инактивации нитчатых грибов. Семена обрабатывали при мощности разряда 260 Вт от 15 до 180 с. Отдельные образцы обработанных семян пшеницы, как и необработанные контрольные, помещали на поверхность питательной агаровой среды (солодовый экстракт) в чашки Петри (диаметр 90 мм) в трех повторностях. После 10 дней инкубации при температуре 25 °С скорость заражения семян проверяли визуально [118, с. 333].

Для выявления влияния плазмы на микрофлору семян пшеницы, зерна заражали грибами и обрабатывали в плазме в течение 15, 120 и 180 с при мощности 260 Вт. Результаты за 15 с времени обработки показали существование как колоний грибов *Aspergillus spp.*, так и *Penicillium spp.* Даже при 120 с воздействия плазмы рост грибов не был полностью подавлен. При обработке в течение 180 с рост был полностью подавлен. Поэтому можно утверждать, что в нашем случае только обработка в течение 180 с при мощности 260 Вт приводит к полной стерилизации семян пшеницы от

инактивирующих патогенов. На рисунке 42 представлены результаты инактивации нитчатых грибов [118, с. 334].

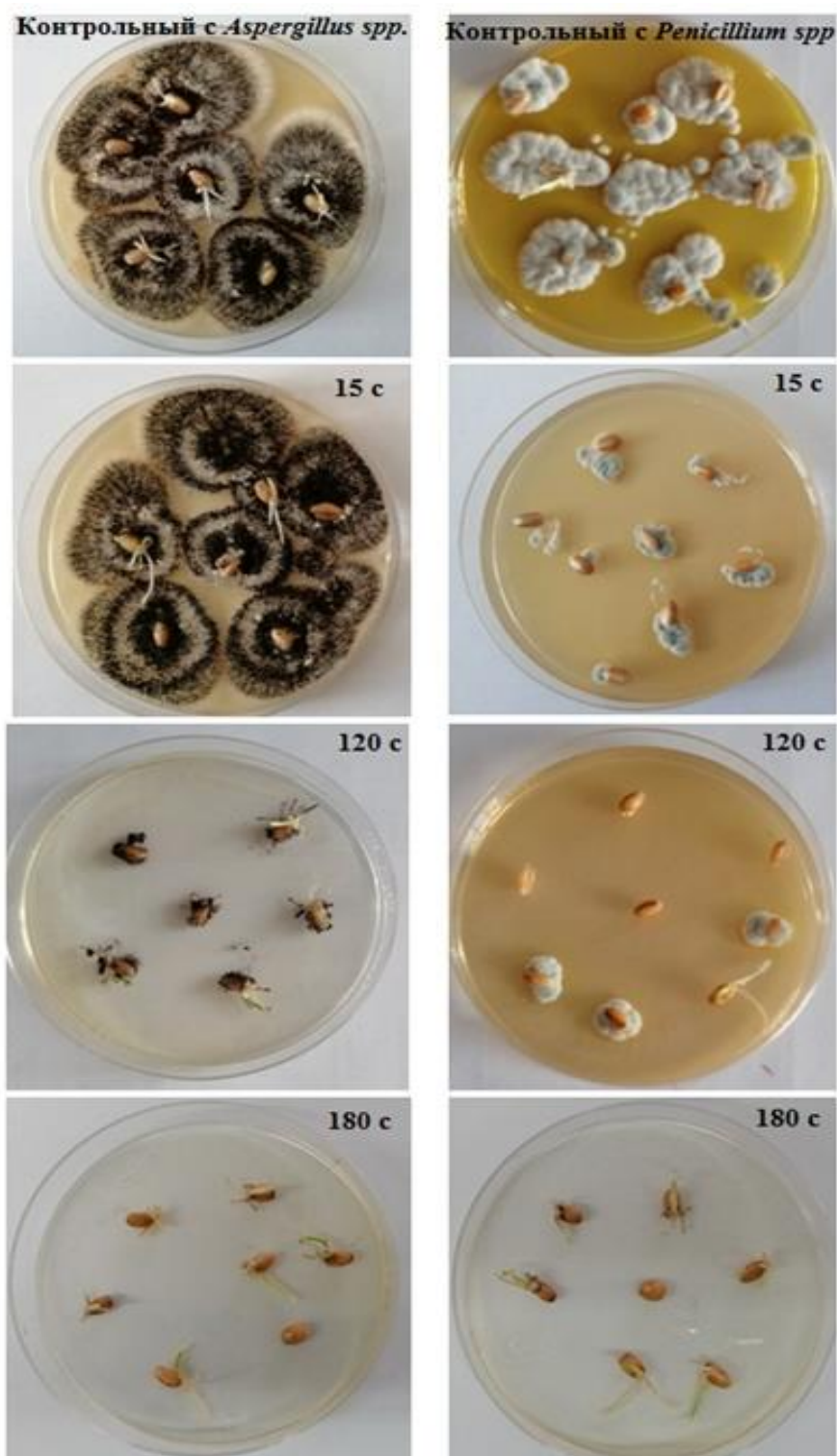


Рисунок 42 – Рост грибов *Aspergillus spp.* (левая колонка) и грибов *Penicillium spp.* (правая колонка) в течение 10 дней после обработки плазмой в течение 0, 15, 120 и 180 секунд при мощности разряда 260 Вт

Вероятно, одним из важных механизмов повышения параметров прорастания и роста после плазменной обработки является обеззараживание поверхности семян от различных патогенов. Неравновесная плазма атмосферного давления является мощным инструментом для эффективной стерилизации и дезинфекции различных поверхностей, включая термочувствительные материалы и живые ткани. Как упоминалось выше, в наших экспериментах рассматривались грибы *Aspergillus spp.* и *Penicillium spp.* Результаты показывают, что заметное снижение количества патогенов начинает сказываться при времени обработки более 120 с, в то время как всхожесть и другие параметры роста показывают максимальное значение при 15 с плазменной обработки. Существенный эффект инактивации патогенных микроорганизмов наблюдается только при 180 с плазменной обработки при 260 Вт. Захаранова и др. [30, с. 401] сообщили, что количество бактерий и грибов уменьшается в несколько раз на поверхности обработанных плазмой семян пшеницы по сравнению с контрольными образцами. Для различных видов грибов критическое время обработки для дезинфекции было различным. Наиболее положительные результаты были достигнуты при времени обработки от 60 с при мощности разряда 400 Вт, а лучшие показатели всхожести (скорость прорастания, индекс вигора) - при 30 с обработки. Результаты других авторов также подтверждают, что для значительной дезинфекции поверхности семян требуется большее время воздействия, чем необходимое оптимальное время обработки для высокой всхожести [138], [118, с. 334].

Микроснимки культурально-морфологической идентификации бактерий *Bacillus spp.*, выделенных из зерен пшеницы, на микроскопе фирмы VM-EX20 (рисунок 43).

Контрольные образцы зерен пшеницы имели уровень обсеменённости до 570 КОЕ/грамм. Как видно из рисунка 43, обработка плазмой в течение 15 секунд не оказывает существенного влияния на зараженность зерен пшеницы бактериями картофельной палочки. При увеличении, периода воздействия обработки на 60 секунд, также все бактерии находились в активном состоянии. Только после обработки плазмой в течение 120 секунд наблюдается незначительное снижение роста бактерий рода *Bacillus spp.*, до 390 КОЕ/г, однако проросшие споры бактерий дают возможность регенерировать в вегетативные формы в кратчайшие сроки. Очевидно для подавления развития споровых палочек бактерий рода *Bacillus spp.* требуется более длительное время обработки плазмой [115, с. 38].

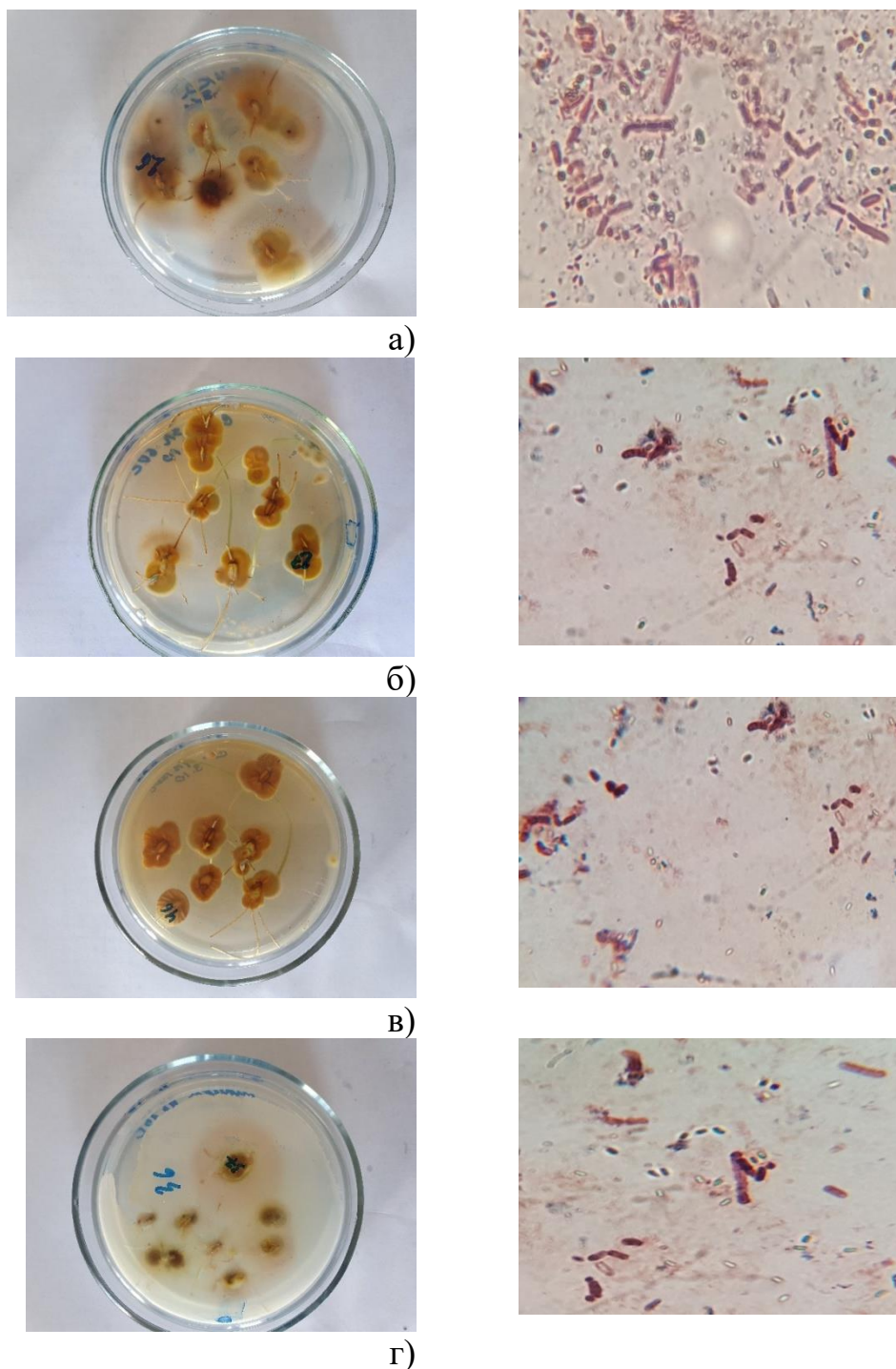


Рисунок 43 – Морфологическая идентификация бактерий выделенных из зерен пшеницы на микроскопе фирмы VM-EX20 (увеличение 200х) и соответствующие микроснимки *Bacillus spp*, а) контрольный, б) зерна пшеницы после 15 с обработки плазмой, в) зерна пшеницы после 60 с обработки плазмой, г) зерна пшеницы после 120 с обработки плазмой [115, с. 38]

3.3 Исследование влияния плазмообработанной воды на рост листьев салата

С ростом населения планеты и сокращением источников продовольствия растет потребность в новых подходах и технологиях в сельском хозяйстве. Помимо основных источников, необходимых для роста растений (как световая энергия, углекислый газ CO_2 и вода H_2O), им также необходимо питание с адекватным содержанием основных макро- и микроэлементов. Одним из наиболее важных макроэлементов является азот. Несмотря на то, что он необходим для роста растений, потеря азота из почвы в результате выщелачивания и стока в окружающую среду приводит к загрязнению воздуха и воды с серьезной угрозой для здоровья. Несмотря на эту проблему, почти 50% производимых сегодня продуктов питания выращивается с помощью азотсодержащих удобрений [139]. Перспективным новым физическим методом является холодная (нетепловая, неравновесная) плазма (ХП). ХП представляет собой плазму, которая создает высокорективную среду, состоящую из высокоэнергетических электронов, заряженных частиц и различных реактивных видов, хотя она создается и поддерживается при комнатной температуре.

В данной работе для исследования плазмообработанной воды выбрали обработку низкотемпературной плазмой атмосферного давления, что связано с легкостью эксплуатации, дешевизной и компактностью установки. Также, как было сказано выше, физические методы обработки воды, особенно обработка воды плазмой, являются экологичными и невредоносными методами.

Для исследования обработки воды низкотемпературной плазмой атмосферного давления с дальнейшим поливом листьев салата собрана новая установка, состоящая из разрядной ячейки, высоковольтного генератора и системы подачи воды. Принципиальным отличием нашей установки от других используемых в данной сфере установок является обработка проточной воды, что связано с планами масштабирования этих экспериментов в дальнейшем и использования в сфере агропромышленности, где необходима подача именно проточной воды для полива больших территорий и объемов. Разрядная ячейка состоит из самой ячейки прямоугольной формы, разделенной на три канала для протекания воды, высоковольтного и заземленного электродов. Заземленный электрод представлен в виде лент, находящихся в каналах ячейки. Таким образом, получается, что вода протекает между двумя электродными каналами, и разряд проходит непосредственно через воду, обеспечивая равномерную обработку. Схематическое изображение установки показано на рисунке 44.

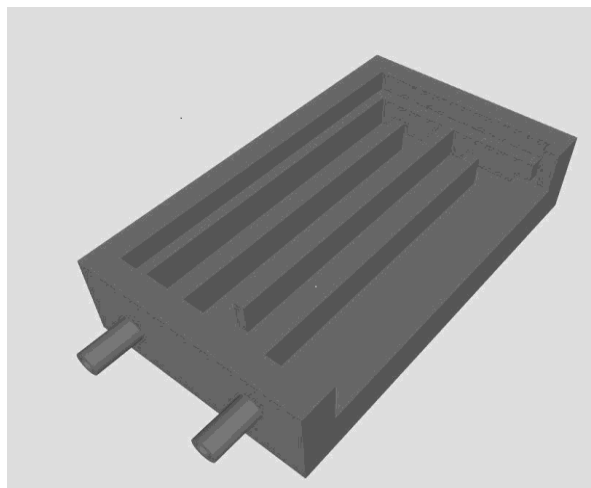
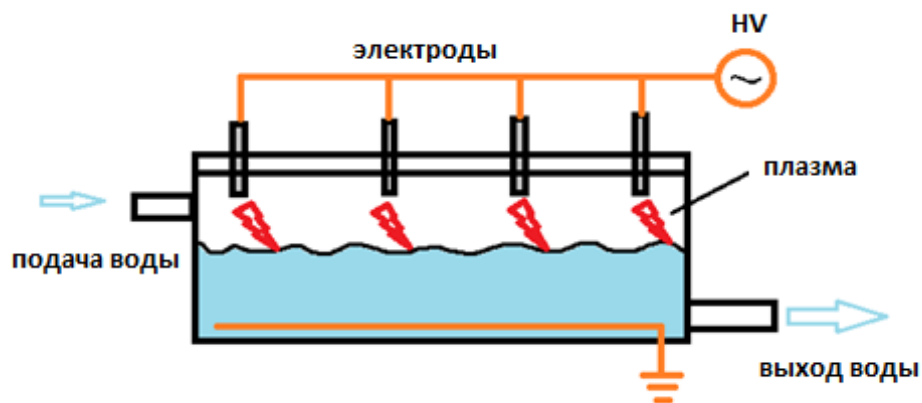


Рисунок 44 – Схематическое изображение установки для обработки воды низкотемпературной плазмой атмосферного давления

Также, для более подробного ознакомления на рисунке 45 представлена фотография установки.

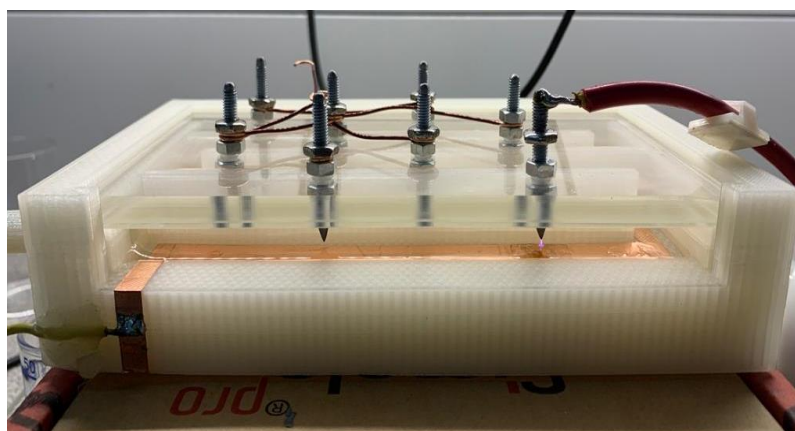
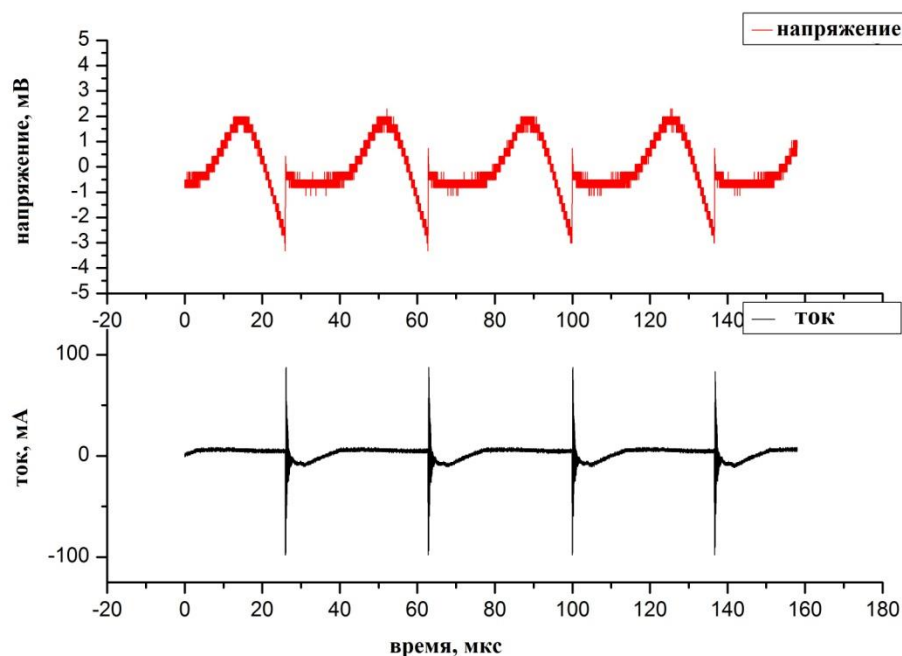
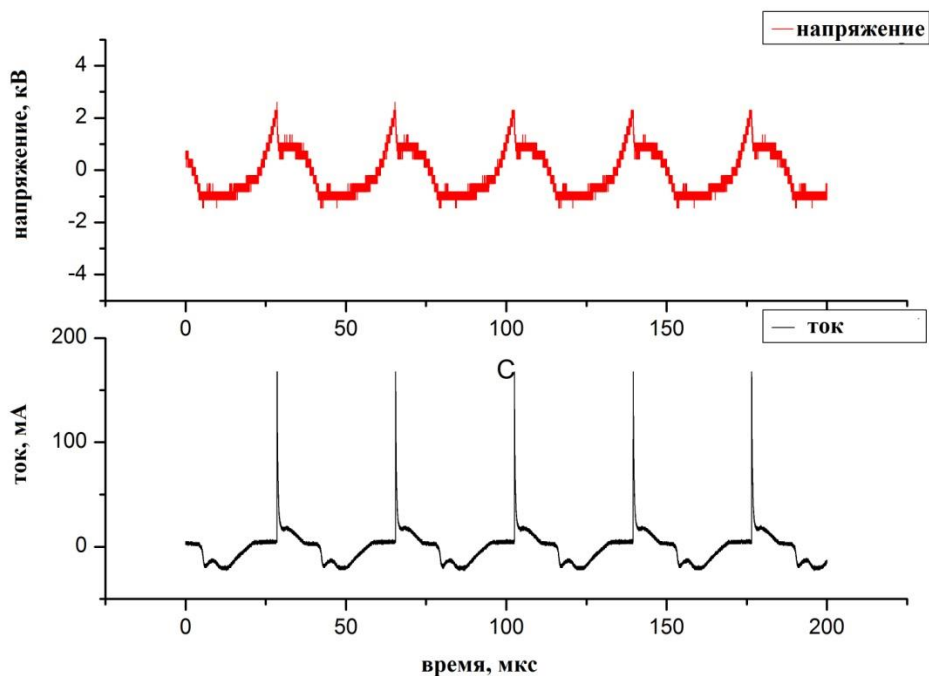


Рисунок 45 – Фотографическое изображение установки для обработки воды низкотемпературной плазмой атмосферного давления

С целью изучения электрических свойств разряда снята вольт-амперная характеристика разряда для двух случаев: вольт-амперная характеристика разряда без подачи потока воды и вольт-амперная характеристика разряда с подачей воды (рисунок 46).



а)



б)

Рисунок 46 – ВАХ разряда, а) ВАХ разряда без подачи воды; б) ВАХ разряда с подаваемым потоком воды 10 мл/мин

С помощью оптико-эмиссионного спектрометра изучены оптические свойства разряда. В спектре излучения разряда наблюдались молекулярные полосы азота, вторая положительная (N_2 (C-B)) и первая отрицательная (N_2^+) системы. На рисунке 47 показаны наблюдаемые пиковые значения от 300 нм до 470 нм [140].

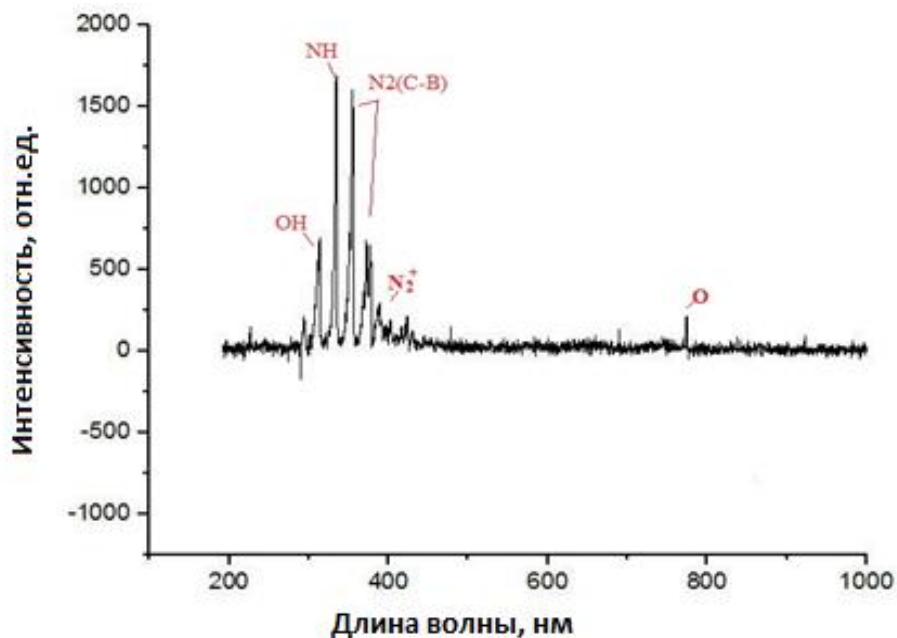


Рисунок 47 – Спектр излучения разряда

Эксперименты по исследованию влияния плазмообработанной воды на рост листьев салата проводились следующим образом: измерялись рН и температура воды для дальнейшего сравнения с обработанным образцом, далее проточная вода подавалась через систему подачи воды к разрядной ячейке, где включался разряд. Поток подаваемой воды был 7 мл/мин. После контрольной (не обработанной) водой и плазмообработанной водой поливались проросшие семена салата.

рН - это мера концентрации водородных ионов в растворе. Уровень рН воды является одним из ключевых факторов прорастания и дальнейшего роста растения. При оптимальном уровне рН растение будет очень легко поглощать питательные вещества, а если уровень рН будет ниже или выше, растение не сможет усваивать некоторые из обязательных элементов, которые необходимы для правильного роста[141].

Для каждого вида растений оптимальный уровень рН является индивидуальным. В наших экспериментах в качестве экспериментального образца выбрали салат, так как он прост в проращивании, уходе и измерении биометрических параметров, необходимых для определения результатов. Оптимальный уровень рН воды для салата варьируется в диапазоне от 5,5 до 6,5.

Для проращивания и ухода при дальнейшем росте листьев салата использовали гидропонную установку с поддержкой одного уровня влажности и температурного режима (рисунок 48). Также гидропонная установка снабжена биолампами, подающими свет в течение необходимого для роста листьев салата времени (12 часов).

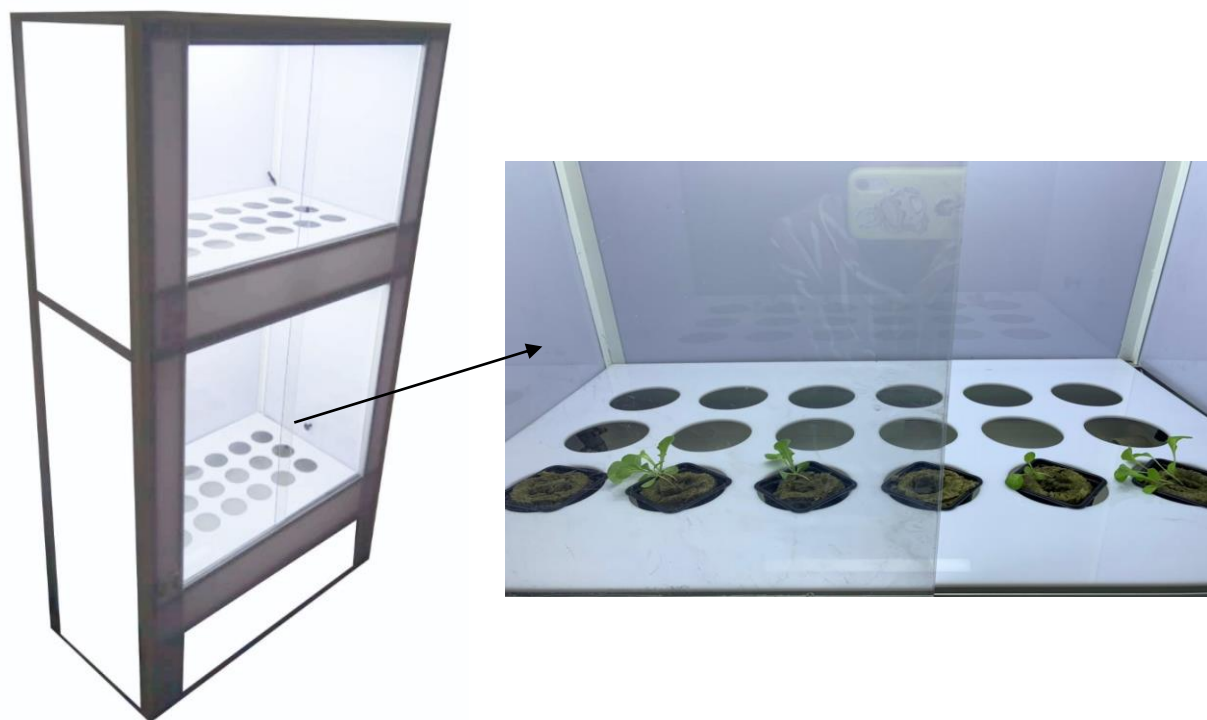


Рисунок 48 – Общий вид гидропонной установки

Для сравнения результатов измерялась длина проросшего стебля над почвой, так как это является одним из биометрических показателей роста растения, а также выбор этого параметра связан с тем, что для произведения измерений не требуется специально оснащенных дорогих биологических устройств. Измерения велись при использовании штангенциркуля. Измерения производились каждый день в течение всего времени роста. Для четкой интерпретации результатов на графике показаны измерения, произведенные в первый, на восьмой, семнадцатый, двадцать четвертый и тридцать первый дни. Результаты экспериментов показали, что стебли тех листьев салата, что были политы плазмообработанной водой были длиннее сравнительно с образцами, политыми обычной водой (рисунок 49). Также растения, политые плазмообработанной водой визуально выглядели более крепкими и здоровыми (рисунок 50).

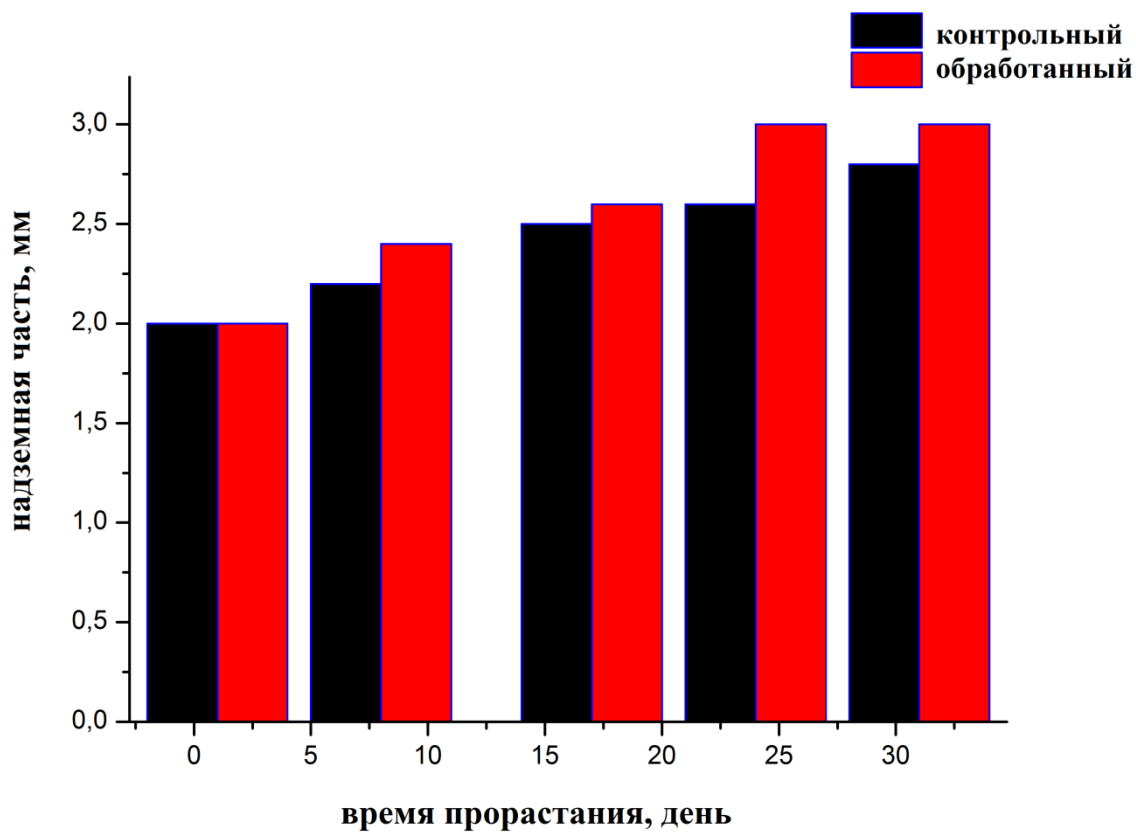


Рисунок 49 – Рост стеблей листьев салата в случаях полива обычной (контрольные образцы) и плазмообработанной водой



а)



б)

Рисунок 50 – Фотоизображения контрольных (а) и политых плазмообработанной водой (б) образцов на 17 день проращивания

Ниже, в таблице 10 показаны результаты экспериментов по исследованию влияния плазмообработанной воды на рост листьев салата.

Таблица 10 – Результаты экспериментов по исследованию влияния плазмообработанной воды на рост листьев салата

| Контрольный образец | Плазмообработанный образец |
|---|---|
| Средний уровень рН=8,13 | Средний уровень рН=6,31 |
| t=19.3С | t=23.0С |
| Среднее количество листьев: 6 | Среднее количество листьев: 9 |
| Процентный показатель роста стебля: 42% | Процентный показатель роста стебля: 55% |

Результаты проведенных экспериментов показали, что уровень рН воды после обработки низкотемпературной плазмой атмосферного давления снижается с 8.13 до 6.31, этот уровень является оптимальным для роста выбранного образца, а именно, листьев салата. Также показано, что температура воды возрастает с 19.3 С до 23.0 С, то есть, она не повышена настолько, чтобы оказать термальный эффект на образцы. Помимо этого, сравнено среднее количество листьев, у контрольных образцов оно равно 6, у обработанных образцов 9. Это можно назвать хорошим результатом, так как большое количество листьев является фактором здорового роста растения. Процентный показатель роста стебля контрольного образца был равен 42%, обработанного образца 55%, что является явным преимуществом, так как, как было сказано выше, показатель роста стебля является одним из ключевых биометрических параметров здорового роста растения. Исходя из предложенных данных, можно предположить, что полив листьев салата плазмообработанной водой имеет лучшие результаты сравнительно с контрольным образцом, и требует дальнейшего, более подробного, изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены результаты по диагностике электрических и оптических свойств плазмы барьерного разряда; изучению динамики и взаимодействия отдельных сферических микрочастиц различных материалов с плазмой поверхностного барьерного разряда; исследованию влияния плазмы барьерного разряда на посевные качества, активность гидролизного фермента альфа-амилазы зерновых культур, воздействия плазмы барьерного разряда на характеристики проточной воды и ее применения в технологии предпосевной обработки семян.

Получены следующие основные результаты:

– изучены электрические и оптические свойства, микроразрядная структура газоразрядной плазмы атмосферного давления. Результаты вольт-амперной характеристики показали, что ДКПБР носит емкостный характер, с наблюдаемыми пиками разрядного тока поверх тока смещения, которые возникают из одиночных стримеров. Химический состав плазмы определен с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии. Наблюдались спектральные линии от 300 нм до 470 нм, которые состоят из радикалов ОН (308 нм), N₂ (С-В) (337 нм и 357 нм), N₂⁺ (В-Х) (380 нм, 390 нм, 427 нм и 470 нм). Азотные спектральные полосы доминируют из-за обилия молекул азота в окружающей атмосфере. Радикалы ОН также присутствуют из-за наличия водяного пара. Интенсивности эмиссионных линий других радикалов, таких как NO, которые ожидаются в условиях влажной атмосферы, были незначительными из-за низкой плотности и эффективного коллизионного тушения соответствующих возбужденных состояний;

– изучены динамика и взаимодействие отдельных сферических микрочастиц различных материалов с плазмой поверхностного барьерного разряда. Показано наличие электрогидродинамического эффекта, который может вызывать такие процессы, как модификация генерации и распространения стримеров, тем самым изменяя плотность нейтрального газа или эффективный перенос долгоживущих реактивных форм кислорода и азота (RONS), что приводит к разрушению поверхностных тонких слоев. Что, в свою очередь, является ключевым фактором в обработке различных биологических материалов плазмой барьерного разряда, так как RONS играет важную физиологическую роль в защите от инфекционных агентов, функционировании ряда клеточных сигнальных путей и индукции митогенных ответов ;

– исследовано влияние плазмы барьерного разряда на посевные качества, активность гидролизного фермента альфа-амилазы зерновых культур и ее применение в технологии предпосевной обработки семян. Результаты показывают увеличение параметров прорастания и роста при обработке в течение 5-15 с и дальнейшее снижение при большей продолжительности обработки. Потенциал прорастания в семенах пшеницы, обработанных в течение 5, 10 и 15 с, составил 100, 96 и 98% после 1 дня имбибиции, соответственно. Значительная разница наблюдалась между обработанной и

контрольной группами (7-17%) ($p < 0,05$). Масса проростков пшеницы, обработанных плазмой, была примерно на 15-18% выше, чем у необработанных растений. Результаты по изучению влияния обработки плазмой атмосферного давления на активность фермента α -амилазы зерна показывают значительное увеличение активности α -амилазы до 1,07 мМЕ - мг⁻¹ белка;

– проведен анализ смачиваемости поверхности семян для определения влияния обработки плазмой барьерного разряда на морфологию семян, который показал, что кажущийся контактный угол капле воды для контрольного образца составлял 80°, а при облучении в течение 5 с - 3 мин он уменьшается с 68° до 0°;

– представлены результаты влияния плазмы барьерного разряда на морфологию оболочки семян пшеницы, поверхностные патогены и активность гидролитических ферментов. Результаты показывают, что одним из возможных ключевых факторов, отвечающих за более высокую всхожесть, является повышение активности фермента α -амилазы. Повышение активности фермента α -амилазы связано с увеличением гидрофильности поверхности семян и высоким поглощением воды. Также решающее влияние на активность α -амилазы оказывают RONS, генерируемые плазмой барьерного разряда. Кроме того, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что такие факторы, как тепловое воздействие плазмы, УФ-излучение, стерилизация поверхности не являются доминирующими в улучшении всхожести.

Оценивая полноту решений поставленных задач можно сделать вывод, что они решены в полном объеме: исследованы электрические и оптические свойства диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда, исследовано влияние обработки нетепловой плазмой атмосферного давления на прорастание и биологический отклик семян пшеницы, морфологию поверхности обработанных образцов, обеззараживание семян путем инактивации бактерий и грибов, а также на активность фермента α -амилазы.

Полученные результаты в рамках выполнения диссертационной работы могут быть применены в различных областях науки и технологии. Результаты по исследованию электрических и оптических свойств ДКПБР могут быть полезными для сборки, наладки и оптимизации некоторых лабораторных установок, использующих плазму атмосферного давления. Результаты по исследованию взаимодействия сферических макрочастиц и плазмы поверхностного разряда могут быть полезны не только с фундаментальной точки зрения для определения механизмов зарядки и действия электрических, электрогидродинамических и гравитационных сил в плазме атмосферного давления, но и с точки зрения практического применения для диагностики свойств плазмы, для обработки дисперсных и порошкообразных материалов с помощью диэлектрических барьерных разрядов. Полученные результаты по влиянию обработки плазмой барьерного разряда могут быть использованы в сфере агропромышленности, в дальнейшем совершенствовании процессов обработки семян низкотемпературной плазмой путем оптимизации ферментативного метаболизма семян на ранней стадии прорастания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Domonkos M. et al. Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry // Applied Sciences (Switzerland). MDPI AG. – 2021. – Vol. 11, № 11. – 4828 p.
- 2 Nishime T.M.C. et al. A coaxial dielectric barrier discharge reactor for treatment of winter wheat seeds // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10, № 20. – P. 7133-7152.
- 3 Kumar A. et al. Cold atmospheric plasma technology for removal of organic micropollutants from wastewater—a review // Eur. Phys. J. D. – 2021. – Vol. 75, № 11. – P. 283-302.
- 4 Doubková Z. et al. Modification of various polymer surfaces using atmospheric pressure reducing plasma // NANOCON 2018. – Conference Proceedings, 10th Anniversary International Conference on Nanomaterials. – 2019. – P. 688-693.
- 5 Gholami A. et al. Effect of low-pressure radio frequency plasma on ajwain seed germination // Plasma Med. – 2016. – Vol. 6, № 3–4. – P. 389-396.
- 6 Park Y. et al. The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley // Plasma Process. Polym. – 2018. – Vol. 15, № 2. – P. 1-8.
- 7 Guo Q. et al. Alleviation of adverse effects of drought stress on wheat seed germination using atmospheric dielectric barrier discharge plasma treatment // Sci. Rep. Springer US. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 1-14.
- 8 Акильдинова А.К. и др. Электрические и оптические свойства диэлектрического ко-планарного поверхностного барьерного разряда // Вестник. Серия физическая. – 2018. – Vol. 2, № 65. – P. 58-65.
- 9 Puač N., Gherardi M., Shiratani M. Plasma agriculture: A rapidly emerging field // Plasma Process. Polym. Institute of Physics, University of Belgrade. – 2018. – Vol. 15, № 2. – P. e1700174.
- 10 Zhou R. et al. Effects of Atmospheric-Pressure N₂, He, Air, and O₂ Microplasmas on Mung Bean Seed Germination and Seedling Growth // Sci. Rep. – 2016. – Vol. 6. – P. 238-247.
- 11 А.А. Акильдинова Влияние обработки плазмой дкпбр на всхожесть семян пшеницы и активность фермента α -амилазы // Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2019. – Vol. 1, № 21. – P. 73-81.
- 12 Ito M. et al. Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies // Plasma Process. Polym. – 2018. – Vol. 15, № 2. – e1700073 p.
- 13 Ling L. et al. Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress // Sci. Rep. – 2015. – Vol. 5. – P. 13033-13043.
- 14 Hosseini S.I. et al. Physico-chemical induced modification of seed germination and early development in artichoke (*Cynara scolymus* L.) using low energy plasma technology // Phys. Plasmas. – 2018. – Vol. 25, № 1. – 013525 p.
- 15 Šimončicová J. et al. Technical applications of plasma treatments: current

state and perspectives // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 103, № 13. – P. 5117-5129.

16 Scholtz V. et al. Nonthermal plasma - A tool for decontamination and disinfection // *Biotechnology Advances*. – 2015. – Vol. 33, № 6. – P.1109-1117.

17 Von Woedtke T. et al. Perspectives on cold atmospheric plasma (CAP) applications in medicine // *Physics of Plasmas*. – 2020. – Vol. 27, № 7. – 070601 p.

18 Shihab A.M. The study of thermal description for non-thermal plasma needle system // *Iraqi J. Phys.* – 2018. – Vol. 16, № 36. – P. 66-72.

19 Julák J. et al. Comparison of fungicidal properties of non-thermal plasma produced by corona discharge and dielectric barrier discharge // *Folia Microbiol.* – 2018. – Vol. 63, № 1. – P.63-68.

20 Khalili F. et al. A study of the effect of gliding arc non-thermal plasma on almonds decontamination // *AIP Adv.* – 2018. – Vol. 8, № 10. – 105024 p.

21 Gibalov V.I., Pietsch G.J. Development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 33, № 20. – P. 2618-2632.

22 Pietsch G.J. Peculiarities of dielectric barrier discharges // *Contrib. to Plasma Phys.* – 2001. – Vol. 41, № 6. – 063520 p.

23 Jeon J. et al. Bactericidal agents produced by surface micro-discharge (SMD) plasma by controlling gas compositions // *Plasma Process. Polym.* – 2014. – Vol. 11, № 5. – P. 426-436.

24 Offerhaus B. et al. Spatially resolved measurements of the physical plasma parameters and the chemical modifications in a twin surface dielectric barrier discharge for gas flow purification // *Plasma Process. Polym.* – 2017. – Vol. 14, № 10. – 1600255 p.

25 Weltmann K.D., Von Woedtke T. Plasma medicine - Current state of research and medical application // *Plasma Phys. Control. Fusion*. – 2017. – Vol. 59, № 1. – 014031 p.

26 Ito M. et al. Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies // *Plasma Process. Polym.* Meijo University. – 2018. – Vol. 15, № 2. – e1700073 p.

27 Šerá B., Šerý M. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains // *Plasma Science and Technology*. – 2018. – Vol. 20, № 4. – 044012 p.

28 Adhikari B. et al. Plant Disease Control by Non-Thermal Atmospheric-Pressure Plasma // *Frontiers in Plant Science*. – 2020. – Vol. 11. – P. 1-11.

29 Iranbakhsh A. et al. Non-thermal Plasma Induced Expression of Heat Shock Factor A4A and Improved Wheat (*Triticum aestivum* L.) Growth and Resistance Against Salt Stress // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2018. – Vol. 38, № 1. – P. 204-215.

30 Zahoranová A. et al. Effect of Cold Atmospheric Pressure Plasma on the Wheat Seedlings Vigor and on the Inactivation of Microorganisms on the Seeds Surface // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2016. – Vol. 36, № 2. – P. 397–414.

31 Roy N.C. et al. Prospective Applications of Low Frequency Glow Discharge

Plasmas on Enhanced Germination, Growth and Yield of Wheat // Plasma Chem. Plasma Process. – 2018. – Vol. 38, № 1. – P. 13-28.

32 Guo Q. et al. Improvement of wheat seed vitality by dielectric barrier discharge plasma treatment // Bioelectromagnetics. – 2018. – Vol. 39, № 2. – P. 120-131.

33 Filatova I. et al. Plasma seeds treatment as a promising technique for seed germination improvement // 31st ICPIG. – 2013. – P. 4-7.

34 Li L. et al. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean // Sci. Rep. – 2014. – Vol. 4. – 5859 p.

35 Zhang J.J. et al. Growth-inducing effects of argon plasma on soybean sprouts via the regulation of demethylation levels of energy metabolism-related genes // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – 41917 p.

36 Sadhu S. et al. Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate*) // LWT - Food Sci. Technol. – 2017. – Vol. 78. – 5922 p.

37 Shiratani M. et al. Plant Growth Response to Atmospheric Air Plasma Treatments of Seeds of 5 Plant Species // MRS Advances. – 2016. – Vol. 1, № 18. – P. 1-5.

38 Bußler S. et al. Impact of cold atmospheric pressure plasma on physiology and flavonol glycoside profile of peas (*Pisum sativum* 'Salamanca') // Food Res. Int. – 2015. – Vol. 76, № P1. – P. 132-141.

39 Butscher D. et al. Plasma inactivation of bacterial endospores on wheat grains and polymeric model substrates in a dielectric barrier discharge // Food Control. – 2016. – Vol. 60. – P. 636-645.

40 Pérez Pizá M.C. et al. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne *Diaporthe/Phomopsis* complex and germination parameters of soybean seeds // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. – 2018. – Vol. 49. – P. 82-91.

41 Billah M. et al. Effects of DBD air plasma treatment on the enhancement of black gram (*Vigna mungo* l.) seed germination and growth // Arch. Biochem. Biophys. – 2020. – Vol. 681. – 108253 p.

42 Măgureanu M. et al. Stimulation of the Germination and Early Growth of Tomato Seeds by Non-thermal Plasma // Plasma Chem. Plasma Process. – 2018. – Vol. 38, № 5. – P. 1-13.

43 Zhou R. et al. Effects of Atmospheric-Pressure N₂, He, Air, and O₂ Microplasmas on Mung Bean Seed Germination and Seedling Growth // Sci. Rep. Nature Publishing Group. – 2016. – Vol. 6, № September. – P. 1–11.

44 Černák M. et al. Generation of a high-density highly non-equilibrium air plasma for high-speed large-area flat surface processing // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2011. – Vol. 53, № 12. – 124031 p.

45 Laroussi M. From killing bacteria to destroying cancer cells: 20 years of plasma medicine // Plasma Processes and Polymers. – 2014. – Vol. 11, № 12. – P. 1138-1141.

46 Ebrahim M.K.H. Stress/tolerance responses of two cotton cultivars exposed to ultraviolet-A (366 nm): Photosynthetic performance and some chemical

- constituents // *Agrochimica*. – 2004. – Vol. 48, № 5–6. – P. 113-124.
- 47 Keidar M. Plasma for cancer treatment // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 24, № 3. – 033001 p.
- 48 Kyzek S. et al. Cold Atmospheric Pressure Plasma Can Induce Adaptive Response in Pea Seeds // *Plasma Chem. Plasma Process. Springer*. – 2019. – Vol. 39, № 2. – P. 475–486.
- 49 Volin J.C. et al. Modification of seed germination performance through cold plasma chemistry technology // *Crop Sci.* – 2000. – Vol. 40, № 6. – P. 1706-1718.
- 50 Meng Y. et al. Enhancement of Germination and Seedling Growth of Wheat Seed Using Dielectric Barrier Discharge Plasma with Various Gas Sources // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2017. – Vol. 37, № 4. – P. 1105–1119.
- 51 Kitazaki S. et al. Growth enhancement of radish sprouts induced by low pressure o 2 radio frequency discharge plasma irradiation // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2012. – Vol. 51, № 1 PART 2. – 01AE01 p.
- 52 Li Y. et al. Air Atmospheric Dielectric Barrier Discharge Plasma Induced Germination and Growth Enhancement of Wheat Seed // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2017. – Vol. 37, № 6. – P. 1621–1634.
- 53 Ding F., Wang R., Wang T. Enhancement of germination, seedling growth, and oxidative metabolism of barley under simulated acid rain stress by exogenous trehalose // *Crop Sci.* – 2018. – Vol. 58, № 2. –P. 783-791.
- 54 Schnabel U. et al. Decontamination of microbiologically contaminated specimen by direct and indirect plasma treatment // *Plasma Process. Polym.* – 2012. – Vol. 9, № 6. – P. 569-575.
- 55 Bormashenko E. et al. Interaction of cold radiofrequency plasma with seeds of beans (*Phaseolus vulgaris*) // *J. Exp. Bot.* – 2015. – Vol. 66, № 13. – P. 2-9.
- 56 Sera B. et al. Seed Germination and Early Growth Responses to Seed Pre-treatment by Non-thermal Plasma in Hemp Cultivars (*Cannabis sativa L.*) // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2017. – Vol. 37, № 1. – P. 207-221.
- 57 Henselová M. et al. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma // *Biologia (Bratisl)*. – 2012. – Vol. 67, № 3. – P. 490-497.
- 58 Shao C. et al. Stimulating effects of magnetized arc plasma of different intensities on the germination of old spinach seeds // *Math. Comput. Model.* – 2013. – Vol. 58, № 3–4. – P. 814-818.
- 59 Dhayal M., Lee S.Y., Park S.U. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium L.* seed surface modification // *Vacuum*. – 2006. – Vol. 80, № 5. – P. 499-506.
- 60 Šerá B. et al. Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2010. – Vol. 38, № 10 PART 2. – P. 2963-2968.
- 61 Laroussi M., Mendis D.A., Rosenberg M. Plasma interaction with microbes // *New J. Phys.* – 2003. – Vol. 5. – P. 41.1-41.10.
- 62 Mendis D.A., Rosenberg M., Azam F. A note on the possible electrostatic disruption of bacteria // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2000. – Vol. 28, № 4. – P. 1304-

1306.

63 Qazi H.I.A., Khan M.A., Huang J. Spatio-temporal evolution characteristics and pattern formation of a gas-liquid interfacial AC current argon discharge plasma with a deionized water electrode // *Plasma Sci. Technol.* – 2021. – Vol. 23, № 2. – 025402 p.

64 Hui Y. et al. Effect of Low Temperature Plasma Treatment on Biological Characteristics and Yield Components of Wheat Seeds (*Triticum aestivum* L.) // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2020. – Vol. 40, № 6. – P. 1555-1570.

65 Naidoo S., Olaniran A.O. Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water resources // *International Journal of Environmental Research and Public Health.* – 2013. – Vol. 11, № 1. – P. 249-270.

66 Jelic A. et al. Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment // *Water Res.* – 2011. – Vol. 45, № 3. – P. 1165-1176.

67 Hijosa-Valsero M. et al. Decontamination of waterborne chemical pollutants by using atmospheric pressure nonthermal plasma: a review // *Environmental Technology Reviews.* – 2014. – Vol. 3, № 1. – 125481 p.

68 Magureanu M. et al. Decomposition of methylene blue in water by corona discharges // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2008. – Vol. 28, № 6. – P. 677-688.

69 Zhou R. et al. Underwater microplasma bubbles for efficient and simultaneous degradation of mixed dye pollutants // *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 750. – 142295 p.

70 Ghernaout D., Elboughdiri N. Foresight Look on the Disinfection By-Products Formation // *OALib.* – 2020. – Vol. 07, № 05. – P. 1-17.

71 Sarangapani C. et al. Degradation kinetics of cold plasma-treated antibiotics and their antimicrobial activity // *Sci. Rep.* – 2019. – Vol. 9, № 1. – 3955 p.

72 Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition // *Plasma Science and Technology.* – 2016. – Vol. 16. – P. 457-506.

73 Foster J.E. Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future // *Phys. Plasmas.* – 2017. – Vol. 24, № 5. – 055501 p.

74 Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 42, № 5. – 053001 p.

75 Bruggeman P.J. et al. Plasma-liquid interactions: A review and roadmap // *Plasma Sources Science and Technology.* Institute of Physics Publishing. – 2016. – Vol. 25, № 5. – 053002 p.

76 Bradu C. et al. Reactive nitrogen species in plasma-activated water: Generation, chemistry and application in agriculture // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2020. – Vol. 53, № 22. – 223001 p.

77 Lukes P. et al. Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: Evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂ // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2014. – Vol. 23, № 1. – 015019 p.

78 Hama Aziz K.H. et al. Degradation of pharmaceutical diclofenac and

ibuprofen in aqueous solution, a direct comparison of ozonation, photocatalysis, and non-thermal plasma // *Chem. Eng. J.* – 2017. – Vol. 313. – P. 1385-1394.

79 Panorel I. et al. Oxidation of Aqueous Paracetamol by Pulsed Corona Discharge // *Ozone Sci. Eng.* – 2013. – Vol. 35, № 2. – P. 116-124.

80 Hao X. et al. Pulsed discharge plasma induced Fenton-like reactions for the enhancement of the degradation of 4-chlorophenol in water // *Chemosphere.* – 2007. – Vol. 66, № 11. – P. 2185-2192.

81 Magureanu M., Mandache N.B., Parvulescu V.I. Degradation of pharmaceutical compounds in water by non-thermal plasma treatment // *Water Research.* – 2015. – Vol. 81. – P. 124-136.

82 El Shaer M. et al. Antibiotics Degradation and Bacteria Inactivation in Water by Cold Atmospheric Plasma Discharges Above and Below Water Surface // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2020. – Vol. 40, № 4. – P. 971-983.

83 Krishna S. et al. Degradation of Verapamil hydrochloride in water by gliding arc discharge // *Chemosphere.* – 2016. – Vol. 152. – P. 47-54.

84 Hao C. et al. Degradation of Pharmaceutical Contaminant Tetracycline in Aqueous Solution by Coaxial-Type DBD Plasma Reactor // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2020. – Vol. 48, № 2. – P. 471-481.

85 Yasmine BaloulDunpin HongSotheara ChuonOlivier Aubry. Preliminary Study of a Non-thermal Plasma for the Degradation of the Paracetamol Residue in Water // *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 10, № 102. – P. 15-27.

86 Nawaz M.I. et al. A study of the performance of dielectric barrier discharge under different conditions for nitrobenzene degradation // *Water (Switzerland).* – 2019. – Vol. 11, № 4. – P. 842-848.

87 Magureanu M. et al. Degradation of antibiotics in water by non-thermal plasma treatment // *Water Res.* – 2011. – Vol. 45, № 11. – P. 3407-3416.

88 Park D.P. et al. Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield // *Curr. Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 13, № SUPPL.1. – P. S19-S29.

89 Mitra A. et al. Inactivation of Surface-Borne Microorganisms and Increased Germination of Seed Specimen by Cold Atmospheric Plasma // *Food Bioprocess Technol.* – 2014. – Vol. 7, № 3. – P. 645-653.

90 Šírová J. et al. The role of nitric oxide in the germination of plant seeds and pollen // *Plant Sci.* – 2011. – Vol. 181, № 5. – P. 560-572.

91 Naumova I.K., Maksimov A.I., Khlyustova A. V. Stimulation of the germinability of seeds and germ growth under treatment with plasma-activated water // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2011. – Vol. 47, № 3. – P. 263-265.

92 El-Maarouf-Bouteau H., Bailly C. Oxidative signaling in seed germination and dormancy // *Plant Signaling and Behavior.* – 2008. – Vol. 3, № 3. – P. 175-182.

93 Su L. et al. Reactive oxygen species induced by cold stratification promote germination of *Hedysarum scoparium* seeds // *Plant Physiol. Biochem.* – 2016. – Vol. 109. – P. 406-415.

94 Møller I.M., Jensen P.E., Hansson A. Oxidative modifications to cellular components in plants // *Annual Review of Plant Biology.* – 2007. – Vol. 58. – P. 459-

481.

95 Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2003. – Vol. 23, № 1. – P. 1-46.

96 Schoenbach K.H., Becker K. 20 years of microplasma research: A status report Topical Issue: Recent Breakthroughs in Microplasma Science and Technology Kurt Becker, Jose Lopez, David Staack, Klaus-Dieter Weltmann and Wei Dong Zhu // European Physical Journal D. – 2016. – Vol. 70, № 2. – P. 99-105.

97 Usenov E.A. et al. The “memory” effect of microdischarges of a barrier discharge in airflow // Appl. Phys. – 2019. – № 5. – P. 12-19.

98 Usenov E.A. et al. The Memory Effect of Microdischarges in the Barrier Discharge in Airflow // Plasma Phys. Reports. – 2020. – Vol. 46, № 4. – P. 459-464.

99 Ю.С. Акишев Влияние барьерного разряда на газодинамические параметры формируемой им плазменной струи // Prikl. Fiz. – 2018. – Vol. 6, № 14. – С. 12-19.

100 A.A. Mutalip et. al. Determination of the reduced electric field in surface dielectric barrier discharge plasmas // Bull. Karaganda Univ. “Physics” Ser. 2021. – Vol. 3, № 103. – P. 35-44.

101 Hagelaar G.J.M. Brief documentation of BOLSIG + version 03 / 2016 // Web.– 2015. – P. 1-20.

102 Разработка научно-технологических основ повышения роста растений и урожайности зерновых культур с помощью обработки холодной плазмой атмосферного давления: отчет о НИР(промежуточный)/АО "НЦГНТЭ": рук. Данияров Т.Т., исполн.: Акильдинова А.К. – Алматы, 2018. – 33 с. – № ГР 0118РК00296.

103 Kozlov K. V. et al. Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharges in N₂/O₂ mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 38, № 4. – P. 518-526.

104 Korbut A.N. et al. Emission properties of an atmospheric-pressure helium plasma jet generated by a barrier discharge // Opt. Spectrosc. (English Transl. Opt. i Spektrosk. – 2014. – Vol. 116, № 6. – P. 919-925.

105 Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Sci. Technol. – 2005. – Vol. 14, № 4. – P. 722-733.

106 Tachibana K. et al. Analysis of a pulsed discharge within single bubbles in water under synchronized conditions // Plasma Sources Sci. Technol. – 2011. – Vol. 20, № 3. – 034005 p.

107 Акильдинова А.К. и др., Исследование электрических и оптических свойств диэлектрического копланарного поверхностного барьерного разряда // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». – 2018. – С. 243.

108 Akildinova A.K. et.al. Electrical and Optical properties of a dielectric coplanar surface barrier discharge // Book of abstracts: Symposium on Plasma Physics and Technology. – Prague, Czech Republic, 2018. – P. 78.

109 Ussenov Y.A., et.al. Thin film deposition by combined plasma jet and spark discharge source at atmospheric pressure // Book of abstracts ESCAMPIG XXIV. – Glasgow, Scotland, 2018. – P. 148.

110 Starikovskaia S.M. et al. On electric field measurements in surface dielectric barrier discharge // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 43, № 12. – 124007 p.

111 Roupasov D. V. et al. Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulsed-periodic discharge // AIAA J. – 2009. – Vol. 47, № 1. – P. 168–185.

112 Demtröder W. Experimentalphysik 1 (Mechanik und Wärme) – Exp. 1, 2008. – 115 p.

113 Park S. et al. The creation of electric wind due to the electrohydrodynamic force // Nat. Commun. – 2018. – Vol. 9, № 1. – P. 371-378.

114 Araújo S. de S. et al. Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology // Frontiers in Plant Science. Frontiers Media – 2016. – Vol. 7, № MAY2016. – 646 p.

115 Разработка научно-технологических основ повышения роста растений и урожайности зерновых культур с помощью обработки холодной плазмой атмосферного давления: отчет о НИР(промежуточный)/АО "НЦГНТЭ": рук. Данияров Т.Т., исполн.: Акильдинова А.К. – Алматы, 2019. – 42 с. – № ГР 0118РК00296.

116 Акильдинова А.К. и др. Исследование обработки семян пшеницы плазмой DCSBD // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». – 2019. – С. 362.

117 A. Akildinova et. al. The effect of DCSBD plasma treatment on wheat seed germination and α -amylase enzyme activity // 24 th International Conference on Phenomena in Ionized Gases. – Sapporo, Japan, 2018. – P. 19.

118 Y. A. Ussenov, A.K. Akildinova et.al. The Effect of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Wheat Seeds on Germination Parameters and α -Amylase Enzyme Activity // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2022. – Vol. 50, № 2. – P. 330-340.

119 Burris J.S. Principles of Seed Science and Technology . L. O. Copeland // Q. Rev. Biol. – 1977. – Vol. 52, № 4. – P. 401-409.

120 Tekrony D.M. Seed vigor testing // J. Seed Technol. – 1983. – Vol. 8, № 1. – P. 27-33.

121 Akildinova A. et.al. Investigation of treatment of wheat seed by plasma of dielectric coplanar surface barrier discharge // Book of abstracts: 24th International Symposium on Plasma Chemistry. – Naples, Italy, 2019. – P. 152-153.

122 Акильдинова и др. Обработка семян агрокультур плазмой DCSBD // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». – Алматы, 2019. – С. 379.

123 Fursov O.V., Khaydarova G.S., Darkanbayev T.B. Purification, Separation and some Properties of α -Amylase Components of Germinating Wheat Grains // Biochem. und Physiol. der Pflanz. – 1986. – Vol. 181, № 3. – P. 177-187.

124 Rahman M.M. et al. Mechanisms and Signaling Associated with LPDBD Plasma Mediated Growth Improvement in Wheat // *Sci. Rep.* Nature Publishing Group. – 2018. – Vol. 8, № 1. – 10498 p.

125 Puač N. et al. Activity of catalase enzyme in *Paulownia tomentosa* seeds during the process of germination after treatments with low pressure plasma and plasma activated water // *Plasma Process. Polym.* – 2018. – Vol. 15, № 2. – P. 1-12.

126 Henselová M. et al. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma // *Biologia (Bratisl.)*. – 2012. – Vol. 67, № 3. – P. 490-497.

127 Bak-Jensen K.S. et al. Spatio-temporal profiling and degradation of α -amylase isozymes during barley seed germination // *FEBS J.* – 2007. – Vol. 274, № 10. – P. 2552-2565.

128 Ji S.H. et al. Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach // *Arch. Biochem. Biophys.* Elsevier Inc. – 2016. – Vol. 605. – P. 117-128.

129 Ji S.H. et al. Characterization of physical and biochemical changes in plasma treated spinach seed during germination // *J. Phys. D. Appl. Phys.* Institute of Physics Publishing. – 2018. – Vol. 51, № 14. – 145205 p.

130 Adhikari B. et al. Cold plasma seed priming modulates growth, redox homeostasis and stress response by inducing reactive species in tomato (*Solanum lycopersicum*) // *Free Radic. Biol. Med.* – 2020. – Vol. 156. – P. 57-69.

131 Kaneko M. et al. The α -amylase induction in endosperm during rice seed germination is caused by gibberellin synthesized in epithelium // *Plant Physiol.* – 2002. – Vol. 128. – P. 1264-1270.

132 Ishibashi Y. et al. The interrelationship between abscisic acid and reactive oxygen species plays a key role in barley seed dormancy and germination // *Front. Plant Sci.* – 2017. – Vol. 8. – 275 p.

133 ГОСТ 15113.6-77. Концентраты пищевые. Методы определения сахарозы // М.: Изд-во стандартов. – 1987. – 16.

134 ГОСТ 12044-93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями // М.: Изд-во стандартов. – 1995. – 87.

135 Фомина О.Н. Зерно. Контроль качества и безопасности по международным стандартам // М. Проректор. – 2001. – 368 с.

136 Шералиев А.Ш. Б.К.В. Видовой состав грибов рода *Fusarium*, поражающих культурные и сорные растения Узбекистана // *Микол. и фитопатол.* – 2001. – Vol. 35, № 2. – P. 44-47.

137 Гагкаева Т.Ю. Защита и карантин растений // *Фузариоз зерновых культур.* – 2011. – Vol. 5. – 120 с.

138 Scholtz V. et al. Effects of Nonthermal Plasma on Wheat Grains and Products // *Journal of Food Quality.* Hindawi Limited. – 2019. – Vol. 2019. – 10 p.

139 López-Valdez F., Fernández-Luqueño F. Fertilizers: Components, uses in agriculture and environmental impacts. – *Biotechnology in Agriculture, Industry and Medicine*, 2014. – 322 p.

140 Акильдинова А.К. и др. Исследование влияния плазмообработанной

воды на рост листьев салата // Сборник тезисов. Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМІ». – Алматы 2022. – С. 347.

141 Патент на инновационную модель: Устройство для низкотемпературной плазменной обработки проточной воды при атмосферном давлении / Е.А. Усенов , А.К. Акильдинова, Казахстан: РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности». – № 5595; заявл.11.08.2020 г., опубл. 27.11.2020 г. – 2 с.