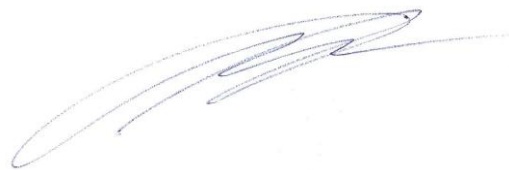


На правах рукописи



ЛАЗУКИН АЛЕКСАНДР ВАДИМОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Кривов Сергей Анатольевич**

доктор технических наук, с.н.с,
профессор кафедры ТЭВН ФГБОУ ВО «НИУ
«МЭИ»

**Официальные
оппоненты:**

Кривошеев Сергей Иванович

доктор технических наук, с.н.с
профессор Высшей школы высоковольтной
энергетики ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Понизовский Александр Залманович

кандидат технических наук,
заместитель главного инженера АО «ОДК»
Филиал «Машиностроительное конструкторское
Бюро "Горизонт"»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»

Защита диссертации состоится «26» ноября 2021 г. в 13 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.019 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, корпус Г, ауд. Г-200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МЭИ.019 к.т.н., доцент



Монаков Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Высоковольтные электротехнологии позволяют реализовывать ряд технологических процессов без промежуточных преобразований электрической энергии, например, в тепловую или механическую, чем определяется их высокая энергоэффективность. Высоковольтные электротехнологии применяются при сепарации сыпучих материалов, газоочистке, очистке сточных вод, синтезе технологических газов, нанесении покрытий, модификации поверхностей различных материалов, в медицинских и сельскохозяйственных приложениях. В сельском хозяйстве необходимость в развитии новых методов обеззараживания посевного материала и фуража, стимуляции прорастания семян, оздоровления и очистки всходов, повышения продуктивности растений возникла на основе перехода к концепции рационального и экологичного природопользования с учетом снижения количества используемых химических и биохимических средств защиты, предпосевной подготовки и стимуляции растений. Как показывают результаты множества исследований, применение высоковольтных электротехнологий помогает решить эту проблему.

Злаки являются основой продовольственной безопасности, социально и экономически значимой культурой не только для Российской Федерации, но и в мире. Совершенствование агроприемов по возделыванию злаков является востребованной и актуальной задачей. Именно поэтому в большинстве современных исследований по экспонированию семян под действием высоковольтного электрического разряда в качестве объекта воздействия выбираются злаки: пшеница, рожь, овёс, рис, кукуруза.

Предпосевная подготовка семян высоковольтным электрическим разрядом, так же, как и другими методами электрофизического воздействия, используется для мобилизации потенциальных генотипически обусловленных возможностей растений и, как следствие, это должно обеспечить повышение полевых всходов, урожайности и качества урожая. Электроразрядное экспонирование семян в оптимальном режиме воздействия дает заметную прибавку к урожайности, составляющую 20-80% . Оптимальный режим связан со свойствами обрабатываемых семян. Даже семена растений одного вида и сорта, но выращенные на разных полях и в разные сроки или хранившиеся в разных условиях, требуют индивидуального подбора оптимального режима электрофизической обработки. Подбор режимов проводится путем сравнения ответа обработанных семян на изменение параметров воздействия. При использовании высоковольтных разрядов под параметрами воздействия понимается время экспозиции семян, напряжение, приложенное к электродной системе, или энергия разряда. При этом между напряжением и энергией существует связь, которая должна быть одинаковой при различных внешних условиях обработки для поддержания неизменного режима воздействия. В поверхностном разряде, как и в других разрядах,

существующих при атмосферном давлении, имеют место процессы, приводящие к повреждению и модификации электродных кромок, что в свою очередь может приводить к изменению характера горения разряда и, следовательно, от эксперимента к эксперименту может меняться характер зависимости энергии от напряжения. Подобная ситуация делает невозможной оценку ответа растения, поскольку режим воздействия постоянно меняется. Актуальной задачей является оценка связи между степенью повреждения электродов, используемых для создания высоковольтного поверхностного разряда, и энергетическими характеристиками поверхностного разряда.

Действие высоковольтного электрического разряда не только может обеспечивать повышение продуктивности культурных растений, но и дает широкие возможности для повышения их устойчивости к различным стрессовым условиям: засухе или бактериальному поражению, что особенно важно для территорий рискованного земледелия. В настоящее время недостаточно исследованы особенности ответа растений, полученных из предварительно обработанных высоковольтным электрическим разрядом семян, на стрессы, вызванные действием низких температур. Это задача является актуальной при разработке методов предпосевной подготовки.

Высоковольтный электрический разряд, с точки зрения воздействия на семена, является многофакторным источником. Актуальной задачей является выявление ключевых действующих факторов воздействия и их связи с морфофизиологическими показателями и устойчивостью растения к действию пониженных температур.

Степень разработанности темы. Использование высоковольтных электрических разрядов для повышения продуктивности растений известно достаточно давно. Применяются дуговой разряд, коронный разряд, разряд в потоке инертных газов, разряды в разряженной атмосфере и барьерные разряды в различных электродных конфигурациях. Барьерные разряды в воздухе в последние годы исследуются наиболее интенсивно, так как обладают рядом преимуществ, таких как: низкая вложенная электрическая энергия, простота исполнения электродных систем, отсутствие расхода технических газов и сложного вакуумного оборудования, а также возможность многофакторного воздействия, что может обеспечить более эффективное воздействие на семена. Действие высоковольтного электрического разряда позволяет достигать 100% протравливание семян. При воздействии электрическим разрядом на семена злаков (пшеница, рожь, овёс) удастся получить значительную прибавку урожайности (20-80%) по сравнению с другими методами электрофизической обработки (СВЧ, КВЧ, УФ, озонирование - 10-15%).

Под многофакторным воздействием со стороны электрического разряда понимается сочетание эффектов от целого ряда физических факторов, каждый из которых в отдельности

используется для предпосевной подготовки. Например, в электродной системе барьерного разряда семена подвергаются действию УФ излучения, сильного электрического поля, объемного заряда, импульсного тока микроразрядов и химически-активных частиц (ХАЧ), синтезируемых из воздуха. Действия ХАЧ и электрического поля являются наиболее широко используемыми самостоятельными факторами воздействия, а их комбинация с другими воздействиями может обеспечить эффективный ответ в более широком диапазоне действующих доз. При обработке семян пшеницы озоном была установлена связь между повышением всхожести, ускорением развития семян пшеницы и дозой воздействия, выраженной в произведении действующей концентрации и времени экспозиции. Приближение обрабатываемого материала к зоне горения барьерного разряда (или помещение в нее непосредственно) обеспечивает повышение концентрации действующего озона, что дает возможность снижения времени экспозиции, повышения производительности и энергоэффективности. При использовании в обработке барьерного разряда выявлена ведущая роль ХАЧ при уничтожении бактерии за счет сравнений прямого и косвенного воздействия в различных конфигурациях. Однако, в литературе нет данных о том, какую роль играет озон среди других действующих на семена со стороны высоковольтного разряда факторов.

Наложение на зону горения поверхностного барьерного разряда внешнего электрического поля в трехэлектродной системе дает возможность создать зону дрейфа ионов. Известно, что действие даже слабого тока и экспонирование в постоянном электрическом поле способны вызывать ускорение развития растений. Однако, практически отсутствуют результаты по исследованию роли ионного тока в трехэлектродных конфигурациях на успешность обработки семенного материала.

Изучению действия разнообразных стрессовых факторов на растение после обработки продуктами разряда посвящены работы различных авторов. Известно, что воздействие электрического разряда способно повысить устойчивость растения к засухе и бактериальному поражению, обеспечивает эффективное протравливание поверхности семян. Подобные эффекты позволяют предполагать, что действие продуктов электрического разряда обеспечивает устойчивость и к другим видам стрессов, например, к заморозкам и действию низких температур. Также представляет интерес сравнение действия химических средств защиты растений, применяемых для предпосевного протравливания семян и обеспечивающих повышение устойчивости к действию низких температур (например, тебуконазолсодержащих протравителей), с действием продуктов электрического разряда. Таких данных в литературе нет.

Цель работы. Установление связи между характеристиками высоковольтного поверхностного электрического разряда в трехэлектродной системе для обработки семян и морфофизиологическими характеристиками и относительной морозоустойчивостью проростков пшеницы.

Задачи исследования:

1. Исследовать интегральные характеристики высоковольтного поверхностного электрического разряда в воздухе в трехэлектродной конфигурации и оценить их влияние на морфофизиологические характеристики и морозоустойчивость проростков пшеницы.
2. Исследовать роль модификации кромки электрода под действием поверхностного разряда в поддержании стабильного режима воздействия на семена.
3. Выявить ключевые электрофизические факторы действующие на семена в трехэлектродной системе поверхностного разряда обеспечивающие эффективную обработку семян.

Объект и предметы исследования. Объектом исследования является высоковольтный поверхностный разряд в воздухе атмосферного давления. Предметами исследования являются интегральные характеристики высоковольтного поверхностного разряда и продукты разряда создаваемые в воздухе атмосферного давления активно влияющие на прорастание пшеницы.

Научная новизна работы. Выявлены закономерности воздействия поверхностного разряда на семена пшеницы при обработке в трехэлектродной конфигурации, которые показывают, что при комплексном электрофизическом воздействии со стороны разряда включающем действие озона, электрического поля, УФ-излучения и ионного ветра повышение морфофизиологических характеристик проростков происходит только при условии, что ионный ветер, создаваемый электродами поверхностного разряда, достигает слоя семян.

Определены режимы обработки семян поверхностным разрядом, существенно повышающие относительную морозоустойчивость пшеницы, районированной по региону рискованного земледелия, при этом показано, что обработка в течение 1 минуты при напряжении на электродах 1,5 кВ повышает относительную морозоустойчивость на 25%.

Установлена связь между временем эксплуатации полосовых медных и алюминиевых электродов в поверхностном разряде и стабильностью режима воздействия на семена, при этом показано, что режим обработки не меняется в системе с медными электродами за первые 10 часов эксплуатации на частоте не выше 30 кГц.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты выполненной работы могут быть использованы в практике сельского хозяйства при предпосевной

подготовке семян методами газоразрядного воздействия. Данные, полученные по сравнительной морозоустойчивости пшеницы, районированной по Иркутской области, также могут быть полезны в практике сельского хозяйства.

Результаты диссертации использованы при выполнении проекта УМНИК "Разработка малогабаритного электрофильтра с зарядным устройством на поверхностном диэлектрическом барьерном разряде" по соглашению №4748ГУ1/2014, в гранте РФФИ 14-34-50203 "Исследование воздействия продуктов низкотемпературной плазмы поверхностного диэлектрического барьерного разряда на ростовые характеристики и морозостойкость яровой (*Triticum durum* L.) и озимой (*Triticum aestivum* L.) пшеницы".

Результаты работы использованы при создании базы данных по характеристикам поверхностного разряда, оформленной в виде свидетельства №2013620349 "Поверхностный электрический разряд: экспериментальные данные, физико-математические модели и технологические особенности". Материалы диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО НИУ "МЭИ" на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений (учебного пособия для студентов "Поверхностный электрический разряд в электротехнологических устройствах и изоляционных конструкциях", под редакцией М.В. Соколовой, издание 2-е дополненное).

Методология и методы исследования. Работа выполнена с использованием современного оборудования и методов измерения электрических характеристик. Измерение напряжения выполнено высоковольтным пробником P6015A (Tektronix), пассивным пробником TPP2220 (Tektronix). При измерении ВКХ использовался дифференциальный пробник DP-150 (Pintek). Запись, первичный анализ и сбор данных — цифровыми осциллографами TDS2024 и TDS3054 (Tektronix). Измерение оптических характеристик разряда — спектрометром AvaSpec-ULS2048x16 (Avantes), высокоскоростной камерой Andor iStar DH-720 (Andor), УФ-радиометром ТКА-ПКМ-12. Измерение концентрации озона и параметров среды — с помощью измерителей концентрации озона Циклон 5.51 и 5.31 (Optec), термогигрометра ИВА-6. Для исследований на относительную морозостойкость применялась климатическая камера МК-56 (Binder). Проращивание — в термостатах ТСО. Исследование электродных кромок — с помощью лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS4000 (Olympus). Для PIV измерений использована лазерная система визуализации потоков FlowMaster Stereo PIV (LaVision).

Положения, выносимые на защиту:

1. Тонкий фольговый электрод, выполненный из меди толщиной 20 мкм, подвергается разрушению в поверхностном разряде в меньшей степени, чем аналогичный электрод, но выполненный из алюминия.

2. Энергия поверхностного разряда в течение первых 10 часов горения на медном электроде увеличивается не более чем на 3% при питании электродов переменным напряжением частотой не выше 30 кГц.
3. Поверхностный разряд во влажном воздухе атмосферного давления при питании высоким переменным напряжением является импульсным источником УФ-излучения с длительностью импульса 15-17% периода. Интенсивность излучения в УФ-А диапазоне порядка 10 мВт/м²
4. Воздействие поверхностного разряда на семена пшеницы в трехэлектродной системе повышает морфофизиологические характеристики проростков при наличии контакта слоя семян с заземленным третьим электродом в случае если ионный ветер достигает слоя семян.
5. Действие поверхностного разряда повышает относительную морозоустойчивость проростков полученных из обработанных семян.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием классических методик исследования высоковольтных разрядов атмосферного давления (вольт-кулонные характеристики, токовые шунты, делители напряжения, высокоскоростная фотография) с применением современного оборудования. Достоверность результатов по работе с растениями подтверждается использованием общепризнанных методов закладки опытов. Анализ результатов выполнен с применением методов математической статистики.

Соответствие работы паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 05.14.12 "Техника высоких напряжений" в работе рассматриваются вопросы, связанные с использованием высокого напряжения в электротехнологии, воздействия сильных электрических полей на различные материалы, развития и количественной оценки электрических разрядов. Работа соответствует областям исследования специальности 05.14.12 по п.1 (исследование физических закономерностей электрических разрядов) и по п.9. (Разработка специальных вопросов применения высоких напряжений в различных областях деятельности человека).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на отечественных международных и зарубежных научных конференциях, в рамках научных школ и симпозиумов: 27th Symposium on Plasma Physics and Technology (Чехия, Прага, июнь 2016), XXXI - XXXIV International Conference on Equations of State for Matter (Кабардино-Балкария, Эльбрус, март 2016, 2017, 2018 и 2019 гг.), 20, 21, 22 и 23 Международная Пущинская школа-конференция молодых ученых «Биология - наука 21 века» (Пущино, апрель 2016, 2017, 2018 и 2019 гг.), 15th и 17th International Workshop on Magneto-Plasma

Aerodynamics (Москва, апрель 2016 и 2018 гг.), Всероссийская научная конференция с международным участием и школа молодых ученых «Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий», VIII Съезд Общества Физиологов растений России (Петрозаводск, сентябрь 2015 г.) и IX Съезд общества физиологов растений России «Физиология растений – основа создания растений будущего» (Казань, 18–24 сентября 2019 г.), Фёдоровские чтения 2014, 2015 и 2018, Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Россия, Москва, ноябрь 2014, 2015 и 2018 гг.), "Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды", годовое собрание Общества физиологов растений России, Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых (Иркутск, 10-15 Июля 2018 г), VIII International Conference "Plasma physics and plasma technology" PPPT-8 (Белоруссия, Минск, Сентябрь 2015 г.), XI конференция «Лазеры и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и применения» (ILLA 2014), Симпозиум «Лазерная нанотехнология» (Шатура, сентябрь-октябрь 2014 г.), 2014 FEBS (Federation of European Biochemical Societies) Conference (Франция, Париж, август-сентябрь 2014 г.), Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014 и ФНТП-2017 (Казань, май 2014 г., июнь 2017 г.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 16 научных работах, в том числе в 4-х работах, опубликованных в журналах, входящих в список ВАК, и 8-ми работах, опубликованных в журналах, индексируемых SCOPUS/WOS, в том числе одной — в журнале с рейтингом Q1.

Личный вклад автора. Автором выполнены обобщение экспериментальных результатов и их статистическая обработка, разработаны и изготовлены различные электродные системы поверхностного разряда, разработаны и созданы стенды для проведения исследования.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования и пяти приложений. Основной текст содержит 125 страниц, включая 69 рисунков, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации приведено описание электродных систем барьерного разряда и способов обработки биологического материала, в том числе семян культурных растений, в таких электродных системах. Описаны две принципиально отличающиеся схемы обработки семян в электродной системе поверхностного разряда: прямая и непрямая. При обработке по прямой схеме семена контактируют с разрядом, находятся на поверхности диэлектрического барьера. Недостатком прямой обработки является повреждение семян при излишней выдержке под действием разряда. При использовании непрямой схемы подобные

повреждения отсутствуют. При обработке по непрямой схеме между разрядом и семенами существует воздушный зазор (Рисунок 1). Семена в этом случае располагаются на поверхности третьего электрода, который может быть заземлен или находится под напряжением.

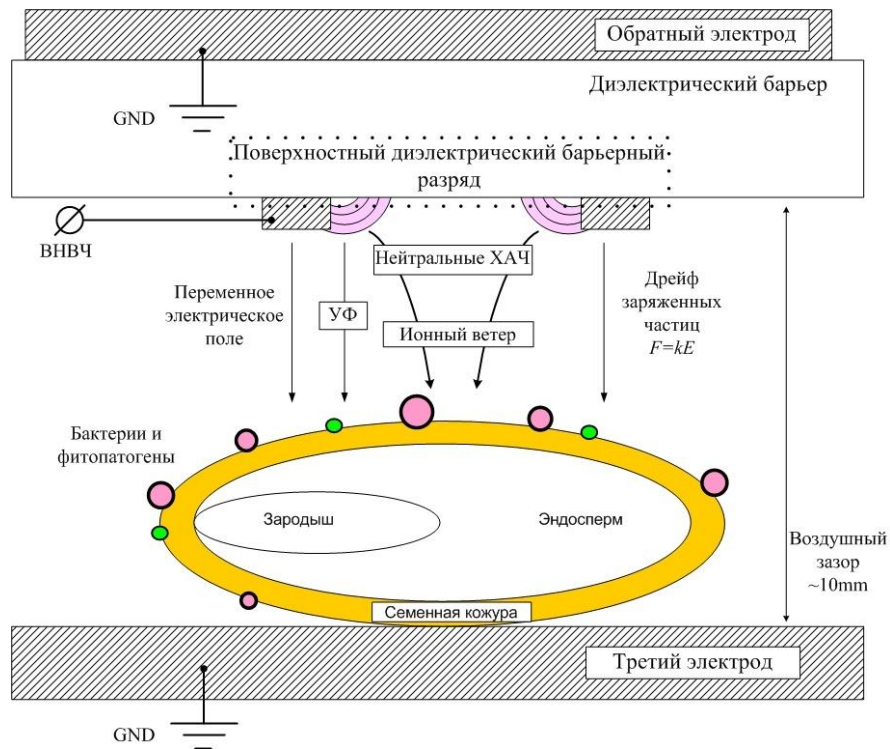


Рисунок 1 — Непрямая схема обработки семян.

Описаны основные действующие на семена со стороны высоковольтного поверхностного разряда факторы: УФ излучение, химически активные частицы (озон), электрического поле и ионный ветер. Каждый из перечисленных действующих факторов может играть ведущую роль при стимуляции прорастания. На каждом из них основан ряд методов предпосевной подготовки семян. Известно, что результаты электрофизической обработки семян зависят не только от вида, но и от сорта этих семян, следовательно, необходимо провести сравнение действия каждого из основных факторов воздействия на одном посевном материале.

Действие электрического разряда способно повышать качественные характеристики прорастания семян: повышать всхожесть, ускорять развитие растения, снижать зараженность, повышать урожайность и качество урожая. Успешность подобной обработки может оцениваться на проростках по их морфофизиологическим характеристикам. Интерес представляет также исследование устойчивости растения к действию низких температур после обработки семян разрядом.

Контроль электроразрядного воздействия при обработке семян проводится по напряжению и энергии разряда. Для поверхностного разряда существует связь между напряжением и энергией. В высоковольтных разрядах, существующих в атмосферном

воздухе, наблюдается разрушение рабочих электродов, которое может привести к изменению режима обработки от эксперимента к эксперименту.

Во второй главе описаны методы исследования, использованные материалы и разработанные стенды. В качестве основной электродной системы для исследования высоковольтного поверхностного разряда и его влияния на семена была использована трехэлектродная конфигурация с различным расстоянием между электродами-полосами (Рисунок 2). В качестве барьера использована керамика из корунда (ВК-94 и ВК-96) толщиной 1 мм. Электроды питаются переменным высоким напряжением. Во всех экспериментах переменное напряжение приложено к полосовым электродам, обратный электрод заземлен.

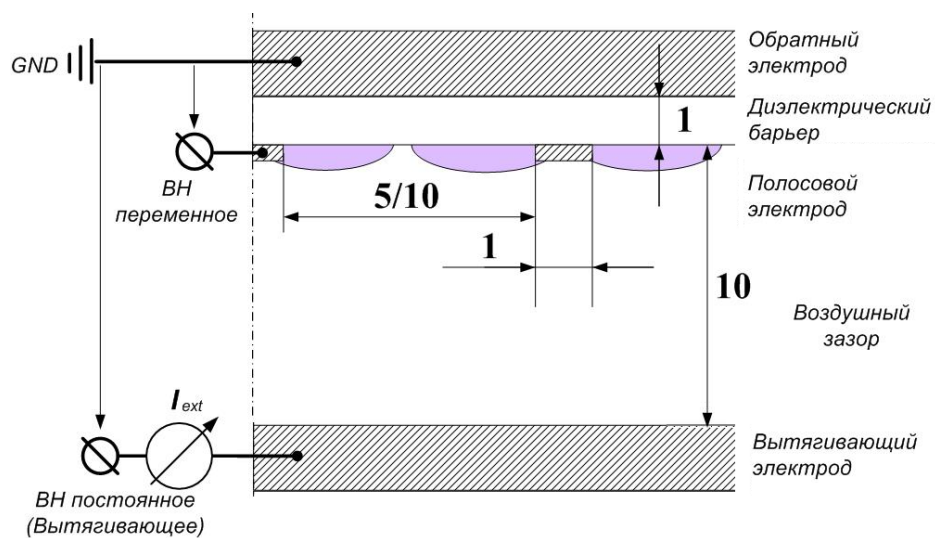


Рисунок 2 — Трехэлектродная система поверхностного разряда.

Были разработаны экспериментальные стенды для исследования действия на семена электрического поля высокого напряжения и для озонирования семян. Озонирование проводилось при выдержках до 60 минут и концентрациях озона до 8 г/м^3 в потоке влажного воздуха. Действие электрического поля высокого напряжения исследовалось с учетом различных вариантов расположения семян в электродной системе. Семена располагались на металлическом электроде, который находился под постоянным напряжением, на заземленном металлическом электроде или на слое диэлектрика. Действие электрического поля высокого напряжения исследовалось при выдержке семян в течение 10 минут в поле напряженностью 3 кВ/см .

Развитие высоковольтного поверхностного разряда исследовалось с помощью измерения энергии разряда по методу вольт-кулонных характеристик с использованием плеча компенсации, измерении импульсов отдельных микрозарядов на малоиндуктивном шунте и измерений воздушных потоков, создаваемых ионным ветром (метод трассерной визуализации частиц, PIV).

В качестве модельного биологического объекта использовались семена мягкой пшеницы, районированной по Восточной Сибири. Семена получены из коллекции Заларинского агроэкологического исследовательского стационара Сибирского института Физиологии и Биохимии Растений СО РАН (с.Тунгуй Заларинского района Иркутской области, расположен в лесостепной части Среднего Приангарья в бассейне реки Заларинка)

В ответ на различные обработки оценивались морфофизиологические характеристики (всхожесть, длина побега и длина индивидуальных корней) и относительная морозоустойчивость двухфазно закаленных проростков в диапазоне температур от -7 до -20 °С. Проводилось сравнение между лучшими режимами действия высоковольтного электрического разряда и действием химического средства защиты растений, повышающего зимостойкость пшеницы.

В третьей главе приведены результаты исследования характеристик высоковольтного поверхностного разряда и связи между этими характеристиками и конфигурацией электродной системы в различных режимах существования разряда.

Полученные результаты по распределению импульсов отдельных микроразрядов по периоду питающего переменного напряжения соответствуют литературным данным. В существовании разряда в виде совокупности отдельных токовых импульсов (микроразрядов), группирующихся по полупериодам, существует пауза. Длительность существования разряда на каждом из полупериодов была оценена по результатам измерений отдельных микроразрядов, выполненных для 3000 периодов питающего напряжения.

Поверхностный разряд излучает в основном на отрицательной полуволне и создается эффективный с точки зрения воздействия на семена импульсный режим УФ облучения. Однако интенсивность излучения высоковольтного поверхностного разряда, измеренная УФ радиометром ТКА-ПКМ-12, составляет порядка 10 мВт/м^2 , что на несколько порядков ниже доз, наблюдаемых в работах по стимуляции семян культурных растений импульсным УФ излучением.

Было исследовано действие высоковольтного поверхностного разряда на электрод, с которого он развивается, и на приэлектродную область диэлектрического барьера. Размеры области диэлектрика, на которую воздействует разряд, оценивались по фотографиям разряда, полученным на высокоскоростную камеру. Разряд развивается на длину 1-3 мм от электрода. На поверхность диэлектрического барьера осаждаются окислы, образующиеся в процессе разрушения электродной кромки. Это приводит к развитию шероховатости диэлектрического барьера (рисунок 3), но не вызывает заметного его разрушения в течение 100 часов наблюдений.

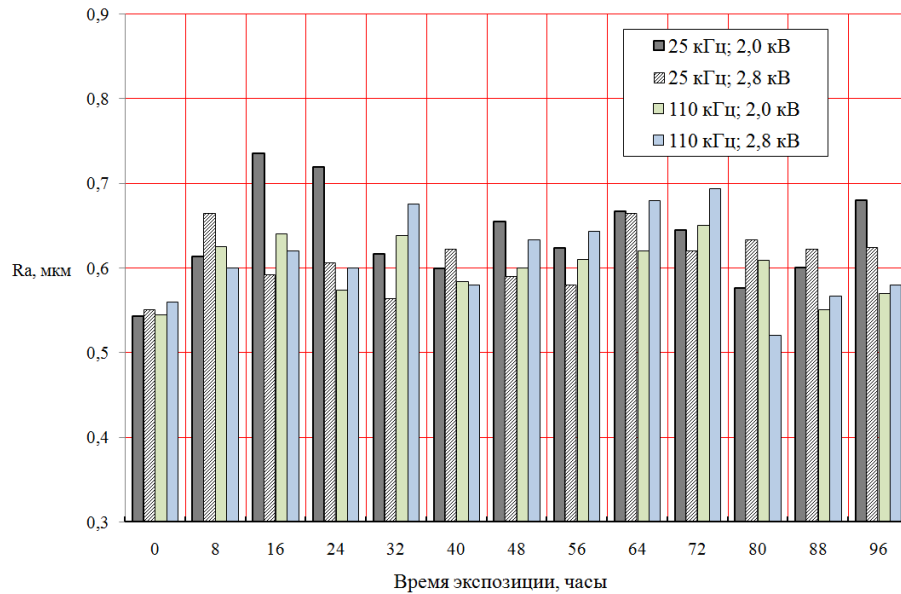


Рисунок 3 — Зависимость шероховатости поверхности диэлектрического барьера от времени выдержки в разряде.

Электродная кромка подвержена значительным повреждениям. Особенно в случае алюминиевого электрода. После выдержки в разряде край алюминиевого электрода отделяется. Энергия разряда при этом меняется значительно. Медный электрод также подвержен модификации за счет осаждения на его поверхность оксидов. Его высота постепенно возрастает (рисунок 4).

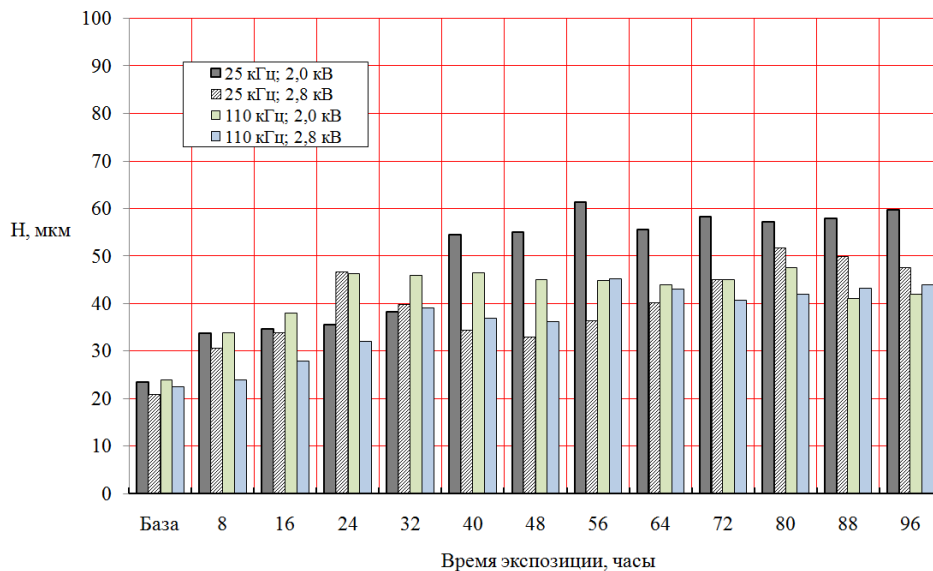


Рисунок 4 — Степень модификации кромки (высота) медного электрода от времени выдержки в разряде.

Подобные обстоятельства повреждения электродных кромок приводят к тому, что энергия разряда меняется, однако, интенсивность этого изменения зависит от частоты питающего напряжения (Рисунок 5). При частоте 25 кГц в течение первых 10 часов использования медных электродов энергия разряда меняется не более чем на 3%. Таким образом, для обработки посевного материала использовались медные полосовые электроды.

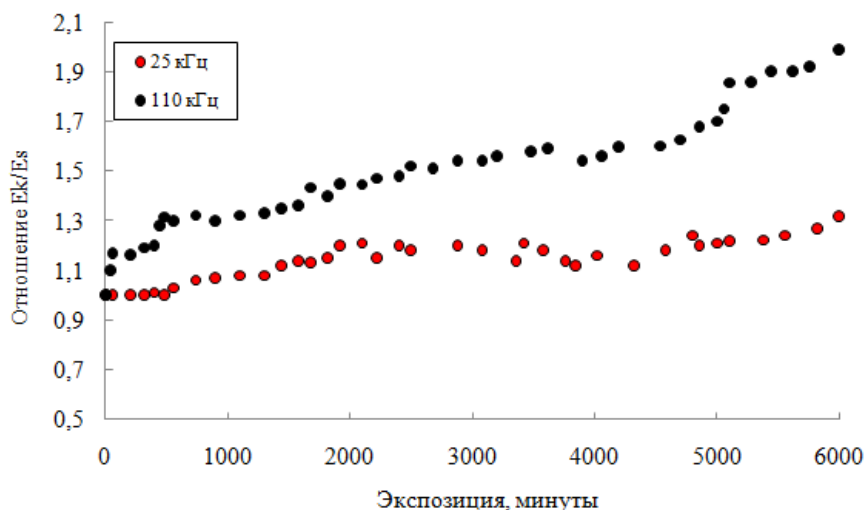
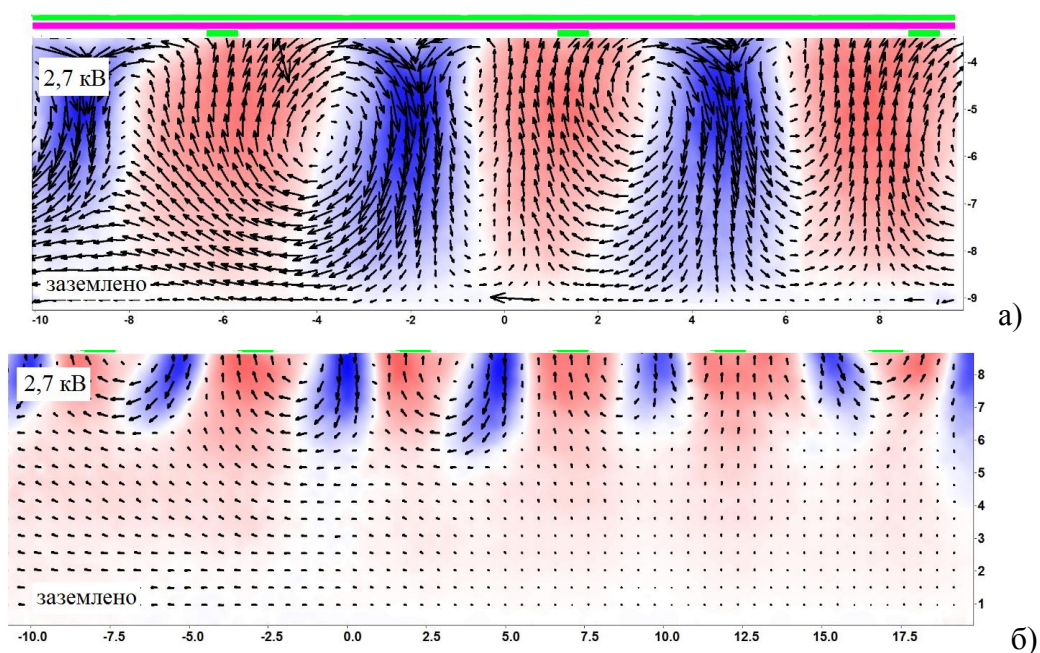


Рисунок 5 – Зависимость отношения текущей энергии разряда к начальной для медных электродов.

Ионный ветер исследовался в трехэлектродных конфигурациях высоковольтного поверхностного разряда с полосовыми электродами. Использовались два типа систем: с расстоянием между полосовыми электродами 5 мм и 10 мм. Расстояние до третьего электрода составляло 10 мм. В зависимости от расстояния между параллельными полосами распределения воздушных потоков в промежутке между диэлектрическим барьером и третьим электродом значительно отличаются. На рисунке 6а приведено распределение воздушных течений при расстоянии между параллельными полосовыми электродами 10 мм, на рисунке 6б - при расстоянии между параллельными полосовыми электродами 5 мм



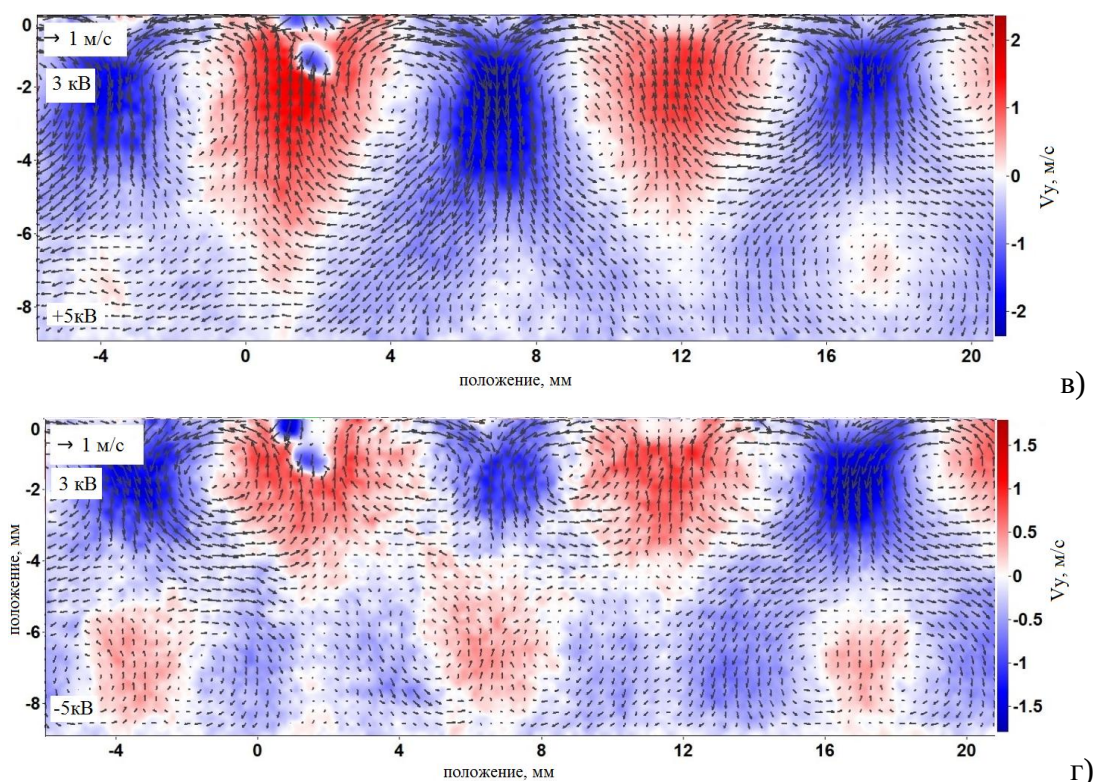


Рисунок 6 – Воздушные течения в промежутке между третьим электродом и барьером.

а) расстояние между электродами поверхностного разряда 10 мм; б) 5 мм; в) +5кВ на третьем электроде; г) -5кВ.

Распределение воздушных потоков в промежутке между диэлектрическим барьером и третьим электродом зависит от полярности напряжения, приложенного к третьему электроду. На рисунке 6в приведен вид воздушного течения при приложении к третьему электроду +5кВ, на рисунке 6г при приложении -5кВ. Скорость воздушного потока в направлении третьего электрода линейно зависит от корня значения вытягиваемого тока (рисунок 7).

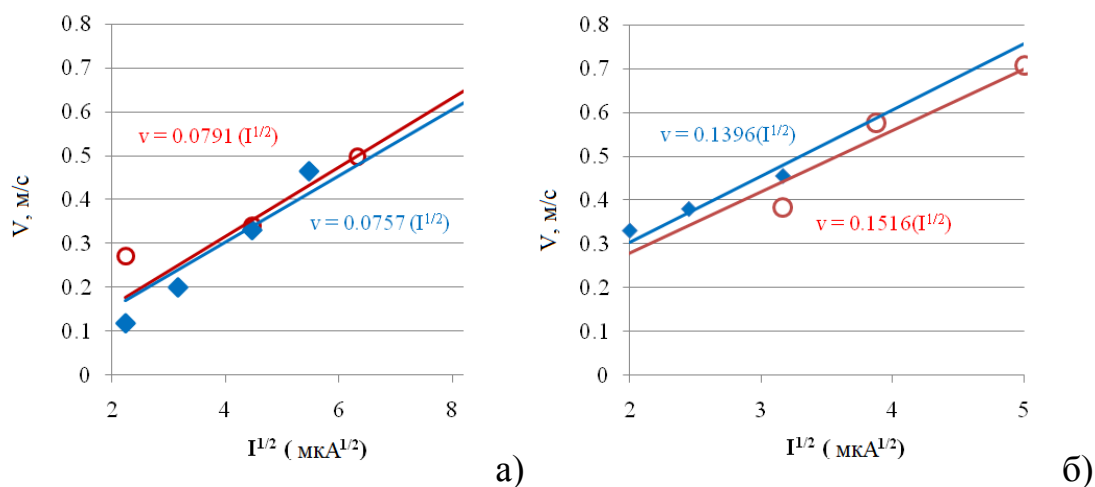


Рисунок 7 – Зависимость скорости воздушного потока от корня вытягиваемого тока для случая расстояния 10 (а) и 5 мм (б) между ПДБР электродами.

В четвертой главе приводятся результаты обработки семян озоном, электрическим полем высокого напряжения и высоковольтным поверхностным разрядом трехэлектродной системы. При обработке семян электрическим полем при различном расположении семян в электродной системе увеличение морфофизиологических характеристик проростков относительно контроля и других вариантов удается достичь только при контакте семян с высоковольтным металлическим электродом, находящимся под положительным напряжением. Время выдержки семян в электрическом поле не менее 10 минут. Действие озона на семена также обеспечивает повышение морфофизиологических характеристик проростков, но время выдержки семян оказывается еще более значительным. Для достижения положительного эффекта требуется выдерживать семена в протоке озono-воздушной смеси порядка 45 минут.

Обработка семян также проводилась в трехэлектродной системе высоковольтного поверхностного разряда. Семена располагались в один слой на плоскости третьего электрода. Были использованы электродные системы с расстоянием между параллельными полосовыми электродами 5 и 10 мм. При расстоянии между электродами 10 мм обнаружены режимы обработки, обеспечивающие стимуляцию прорастания (Рисунок 8а). При расстоянии между электродами 5 мм, когда ионный ветер не достигает слоя семян, повышения морфофизиологических характеристик не наблюдается (Рисунок 8б).

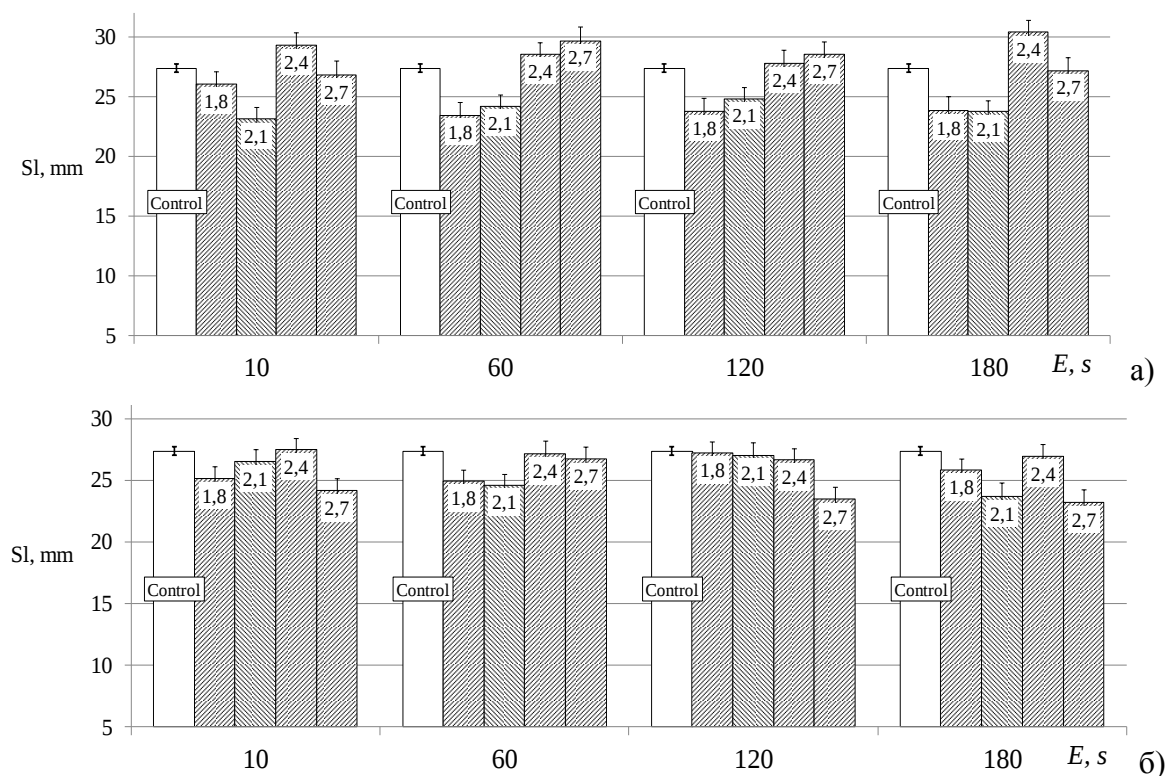


Рисунок 8 – Длина побега проростков после обработки семян поверхностным разрядом
а) 10 мм между полосами б) 5 мм между полосами.

При приложении к третьему электроду напряжения повышения морфофизиологических характеристик семян не наблюдается, независимо от полярности напряжения, приложенного к третьему электроду.

Были проведены сравнения режимов обработки семян в трехэлектродной системе с выдержкой от 0,2 до 30 минут и при напряжениях от 1,5 до 2,9 кВ. Наилучшие режимы достигаются при 1,5 и 2,7 кВ в системе с 10 мм между полосовыми электродами. С точки зрения энергетической эффективности режим обработки при 1,5 кВ является более предпочтительным. В том числе и при сравнении с данными из литературных источников.

Были проведены исследования относительной морозоустойчивости проростков пшеницы, полученных из семян, обработанных в трехэлектродной конфигурации поверхностного разряда. В режиме обработки 1,5 кВ удается повысить устойчивость к отрицательным температурам, сравнимую с действием тебуконазолсодержащего протравителя (повышает зимостойкость злаков). Сравнение обработок показано на рисунке 9.

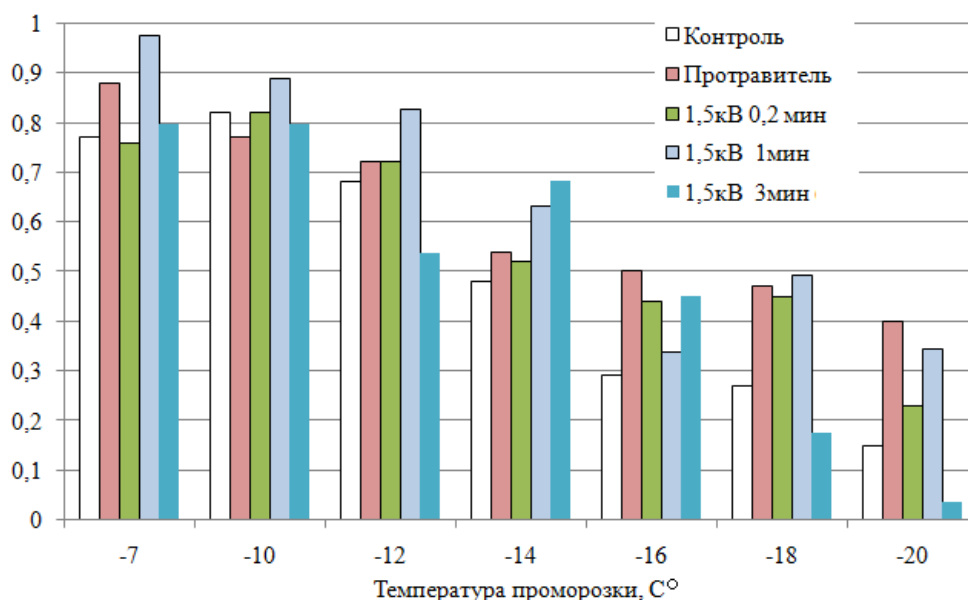


Рисунок 9 – Относительная морозоустойчивость проростков, обработанных протравителем и обработанных в трехэлектродной системе поверхностного разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментального исследования интегральных характеристик высоковольтного поверхностного барьерного разряда (излучение, ионный ток, энергия, распределения микроразрядов) в воздухе в трехэлектродной системе, при воздействии которого на семена наблюдается положительное влияние на морфофизиологические характеристики и относительную морозоустойчивость проростков пшеницы. Получены распределения отдельных микроразрядов (импульсы с острым фронтом, длительностью по полувысоте до 10 нс, переносящие заряд порядка 10 нКл) для отрицательного и положительного полупериода переменного питающего напряжения. При

действии высоковольтного поверхностного разряда реализуется обработка с естественной паузой в облучении. Длительность импульса излучения, формируемого группой отрицательных микрозарядов, составляет 15-17% периода питающего напряжения. Интенсивность УФ-А и УФ-С излучения из плазмы относительно невысока и в рассматриваемых условиях (влажный воздух атмосферного давления) составляет порядка 10 мВт/м². Зона горения высоковольтного поверхностного разряда покрывает электродную кромку и захватывает поверхность диэлектрика, прилежащую к электродной кромке на дистанции до 5 мм. На диэлектрике оседают окислы в виде небольших возвышений, что приводит к развитию рельефа. Рост шероховатости поверхности по параметру Ra от 0,55 мкм до 0,7-0,95 мкм. Электроды (медный и алюминиевый) повреждаются в значительной степени. За счет формирования пористых оксидных образований растет высота электродной кромки, что приводит к динамике энергии во время действия высоковольтного поверхностного разряда. Сравнение различных частот и напряжений показало, что медные электроды пригодны к использованию. Однако время их использования не должно превышать 10 часов при частоте не выше 25-30 кГц.

Рассмотрены различные полярности напряжения, приложенного к третьему электроду, и случай заземленного третьего электрода. Было проведено сравнение воздушных течений в электродных системах поверхностного разряда с расстоянием между параллельными полосами 5 и 10 мм. В случае расстояния между полосами 5 мм воздушное течение сосредоточено около поверхности диэлектрического барьера и не достигает плоскости третьего электрода. Установлено, что воздействие озона позволяет получить режимы с достоверной стимуляцией прорастания, однако требуемое для этого время экспозиции составляет не менее 45 минут. Установлено, что действие поля высокого напряжения на семена связано не только с направлением этого поля, но и с обстоятельствами контакта между семенами и электродом. Наилучшие результаты достигаются при контакте с высоковольтным положительным электродом. Наилучшие результаты по обработке в трехэлектродной конфигурации обеспечиваются, когда воздушный поток, создаваемый высоковольтным поверхностным разрядом, достигает слоя семян, что связано с расстоянием между параллельными полосами, сравнимым с высотой зазора между барьером и третьим электродом. Несмотря на положительное действие электростатического поля высокого напряжения, наложение потенциала на третий электрод снижает эффект от обработки поверхностным разрядом в трехэлектродной конфигурации.

Наилучший режим воздействия достигается в электродной системе, состоящей из параллельных медных полос, расположенных на расстоянии 10 мм. Семена пшеницы лежат в один слой на заземленной плоскости, удаленной от поверхности диэлектрического барьера

на расстояние 10 мм. В такой конфигурации при напряжениях 1,5 и 2,7 кВ удается стимулировать длину побега и суммарную длину корней. В режиме обработки 1,5 кВ удается повысить устойчивость к отрицательным температурам, сравнимую с действием тебуконазолсодержащего протравителя (повышает зимостойкость злаков).

ВЫВОДЫ

1. Медные и алюминиевые фольговые электроды толщиной 20 мкм, создающие высоковольтный поверхностный диэлектрический барьерный разряд, подвержены интенсивной модификации в области привязок микрозарядов. Модификация развивается по времени существования высоковольтного поверхностного разряда и, как следствие, вызывает изменение энергии разряда. Характер и скорость изменения энергии связаны с материалом электрода, значением и частотой приложенного напряжения.
2. Характер распределения воздушных потоков в трехэлектродной системе высоковольтного поверхностного диэлектрического барьерного разряда связан с расстоянием между полосовыми электродами и зависит от полярности приложенного к вытягивающему электроду напряжения. Связь между скоростью ионного ветра и корнем из вытягиваемого тока линейная, что аналогично подобной зависимости для высоковольтного коронного разряда на постоянном напряжении. Результаты обработки семян в трехэлектродной системе зависят от распределения ионного ветра в промежутке между диэлектрическим барьером и третьим электродом. Более значимый положительный ответ наблюдается, когда ионный ветер достигает слоя семян.
3. Воздействие высоковольтного поверхностного диэлектрического барьерного разряда на семена пшеницы способно обеспечивать повышение морфофизиологических характеристик проростков на начальном этапе развития и повышать морозоустойчивость закаленных проростков в широком диапазоне отрицательных температур.
4. Действия электрического поля и озона также стимулируют морфофизиологические характеристики проростков, полученных из обработанных семян. Однако время выдержки семян, необходимой для достижения положительного ответа, оказывается более значительным (45 минут при действии озона и 10 минут при действии электрического поля), чем при обработке семян высоковольтным поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом (1-3 минуты).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Krivov S.A.** Effect of constant high-voltage electric field on wheat seed germination / S.A. Krivov, **A. V. Lazukin**, Y. A. Serdyukov, S. V. Gundareva, G. A. Romanov // IoP SciNote, -2020, -Vol.1, -N1, -p 024002
2. **Lazukin A.V.** The statistical data on microdischarges of the surface dielectric barrier discharge unit based on aluminum nitride barrier / A.V. Lazukin, T. Chernyshev, D. Krivoruchko // Physics of Plasmas. -2019, -Vol.26, -N3, -p 033509

3. **Lazukin A.V.** The effect of surface barrier discharge plasma products on the germination of cereals / A. V. Lazukin , O. I. Grabel'nykh, , Y. A. Serdyukov, T. P. Pobezhimova, V. N. Nurminskii, A. V. Korsukova, S. A. Krivov // *Tech. Phys. Letters*. -2019, -Vol.45, -N1, -p.16-19
4. **Лазукин А. В.** Влияние длительности периода питающего напряжения и конфигурации электродов на длину микрозарядов в поверхностном барьерном разряде / А.В. Лазукин, И. В. Селивонин, М.Э. Пинчук, И. А. Моралев, С.А. Кривов, // *Известия ВУЗов. Физика*. -2018. -Т.61, №9-2(729), -с.152-156
5. **Лазукин А. В.** Коаксиальная система с плазмогенерирующим эмиттером на поверхностном разряде / А.В. Лазукин, С.А. Кривов // *Электричество*. -2017.-№5.-С.4-11
6. **Лазукин А. В.** Предпосевная обработка семян озимой пшеницы поверхностным разрядом / А.В. Лазукин, С.В. Гундарева, И. А. Моралев, С.А. Кривов, // *ЖТФ*. -2020. -Т.90, -№10, -с.1621-1627
7. **Лазукин А. В.** Об особенностях воздействия поверхностного разряда на диэлектрические барьеры / А.В. Лазукин, А.Н. Митин, М.В. Соколова, С.А. Кривов // *Электричество*. -2011.-№11.-С.37-43
8. **Лазукин А. В.** Влияние частоты питающего напряжения и материала диэлектрического барьера на спектральный состав излучения плазмы поверхностного разряда / А.В. Лазукин, Д.И. Кавыршин, С.А. Кривов, С.Д. Федорович, // *Вестник МЭИ*. -2016.-№6.-С.24-30
9. **Lazukin A.V.** Surface barrier discharge pre-sowing treatment of winter wheat seeds in a three-electrode arrangement with dc bias / A. V. Lazukin, S. V.Gundareva, A. M. Nikitin, J. A. Serdykov, S. A. Krivov // *Journal of Physics: Conference Series*. -2020, -Vol.1556, -N1, -p.012089
10. **Krivov S. A.** Ion Wind in a Three-Electrode Surface Barrier Discharge Arrangement. / S. A. Krivov, I. A. Moralev, **A. V. Lazukin**, I. V. Selivonin // *IEEE TPS*. -2020, -V.48,-N7, -p.2442-2447
11. **Selivonin I. V.** Effect of electrode degradation on the electrical characteristics of surface dielectric barrier discharge / I. V. Selivonin, **A. V. Lazukin**, I. A. Moralev, S. A. Krivov // *PSST*, -2018, -Vol.27,-N8, -p.2442 -85003
12. **Lazukin A.V.** Modification of an aluminum electrode in a surface dielectric barrier discharge plasma / A.V. Lazukin, I. V. Selivonin, I. A. Moralev, S. A. Krivov // *JoP: Conference Series*. -2017, -Vol.927,-N1228, -p.012028
13. **Lazukin A.V.** Treatment of spring wheat seeds by ozone generated from humid air and dry oxygen / A.V. Lazukin, Y. Serdyukov, M. Pinchuk, O. Stepanova, S.A. Krivov, I. Lyubushkina // *RAE*. -2018, -Vol.64, -N1, -pp.34-40
14. **Lazukin A. V.** Frequency-dependent transition from homogeneous to constricted shape in surface dielectric barrier discharge and its impact on biological target / A. V. Lazukin, Y. A. Serdyukov, M. E. Pinchuk, O. M. Stepanova, S. A. Krivov, O. I. Grabelnykh, // *JoP: Conference Series*. -2018. -Vol.946.-N1228 -p.012140
15. **Lazukin A.V.** The study of the effects of surface dielectric barrier discharge low temperature plasma products on spring and winter wheat germination / A.V. Lazukin, I.V. Lyubushkina, K.A. Kirichenko, O. I. Grabelnykh, S.A. Krivov, A. M. Nikitin // *Journal of Stress Physiology and biochemistry*. -2015. -Vol.11, -N1, pp 5-15
16. **Lazukin A. V.** Effect on the dielectric barrier surface discharge treatment of various sowing materials / A. V. Lazukin, S.A. Krivov, A. M. Nikitin, I. V. Lyubushkina, O. I. Grabelnykh, V. Michalevskii, O. Novodvorskii // *High Temperature material processes: an international journal*. -2014. -Vol.18, -N1-2, pp 131-134