

На правах рукописи

Пожидаев Денис Владимирович

ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООЗОНАТОРА ДЛЯ
ДЕЗИНФЕКЦИИ БИОРЕАКТОРОВ

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель

Нормов Дмитрий Александрович,
доктор технических наук, профессор, и.о.
заведующего кафедрой электроснабжения и
теплоэнергетики имени академика
И. А. Будзко ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени
К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты:

Самарин Геннадий Николаевич,
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник, заведующий
лабораторией инновационных технологий и
технических средств кормления в
животноводстве отдела механизации и
автоматизации процессов в животноводстве
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Цокур Дмитрий Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
электрических машин и электропривода
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ

Ведущая организация

РГУНХ Минсельхоза России

Защита состоится 19 июня 2025 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Биотехнологии представляют собой значимый инструмент устойчивого развития сельского хозяйства. Культивирование микроорганизмов в биореакторах – одно из направлений в сельскохозяйственной промышленности, объектами которой являются полезные микроорганизмы, такие как дрожжи, фотосинтезирующие, органотрофные бактерии, цианобактерии и грибы, а также которые необходимы для производства молочнокислой продукции, аграрного производства, переработки органических отходов и других сфер. При культивировании микроорганизмов чаще всего применяется способ глубинного выращивания. В продезинфицированный термическим способом биореактор подается заранее измельченное, охлажденное и подготовленное сырье. Перед каждым засевом новой культуры необходимо существенно снижать количество условно-патогенных микроорганизмов. Классическим способом такой дезинфекции является применение горячего водяного пара. Этот процесс является достаточно энергоемким и дорогостоящим. Согласно данным Министерства сельского хозяйства РФ и Россельхознадзора, на территории России функционирует свыше 1000 биологических лабораторий сельскохозяйственного профиля, включая научно-исследовательские институты, ветеринарные центры и частные агролаборатории, каждая из которых содержит от 6 до 20 биореакторов, расход электроэнергии для получения пара при одном цикле работы одного биореактора объемом 4 м³ составляет более 72 кВт·ч, таким образом, использование классического метода дезинфекции биореакторов потребляет в год в среднем более 54 000 МВт·ч электроэнергии, что довольно значимо даже в пределах всей страны.

Проблемам повышения эффективности и применения электроозонирующих устройств в сельском хозяйстве посвящены труды авторов: Бородина И. Ф., Сторчевого В. Ф., Самарина Г.Н., Нормова Д.А., Оськина С.В., Овсянникова Д.А., Шевченко А.А. и др.

Степень разработанности темы. Применение озонородушных смесей для дезинфекции различных сред успешно применяется уже много лет. Существенный вклад в изучение этой темы внесли исследователи Ксенз Н.В., Вашков В.И., Конев С.В., Матус В.К., и др.

Однако, в трудах этих ученых не рассмотрены процессы работы электроозонаторов в условиях внутренней среды биореакторов. При этом, в цикле работы биореактора, он наполнен воздухом с влажностью более 90 %, а использование электроозонирующего оборудования в таких условиях приводит к скорому выходу его из строя.

Цель работы: определение параметров и режимов работы электроозонаторов для дезинфекции биореакторов.

Объект исследований: электроозонатор для дезинфекции биореакторов.

Предмет исследования: электрические параметры ячейки разрядного блока, зависимости его геометрических размеров и физические характеристики разрядного блока, электротехнологический процесс дезинфекции биореактора.

Согласно поставленной цели работы были сформулированы **задачи исследований:**

1. Провести сравнительный анализ технологий обеззараживания биореакторов и обосновать выбор электроозонирования как энергоэффективного метода дезинфекции.

2. Определить конструктивные параметры разрядной ячейки электроозонатора, обеспечивающие устойчивую генерацию озона при влажности обрабатываемой среды свыше 90 %.

3. Разработать математические модели разрядного блока, учитывающие влияние напряжения питания, влажности воздуха и геометрических параметров ячейки на электрическую прочность диэлектрика и распределение напряжённости поля.

4. Экспериментально определить оптимальные режимы озонной обработки (концентрация озона, время экспозиции) для достижения требуемого уровня дезинфекции биореакторов ($K \leq 0,1$ %).

5. Разработать электротехнологический процесс дезинфекции биореакторов озоном, обеспечивающий минимальное энергопотребление без нарушения биотехнологического процесса.

6. Оценить экономическую эффективность предложенной технологии в сравнении с традиционными методами обеззараживания.

Методы исследования: теория поля; теория цепей; законы электротехники; основы математического моделирования; моделирование в среде Elcut; статистическая обработка экспериментальных данных, количественный учет микрофлоры по методу НВЧ (наиболее вероятные числа).

Научная новизна работы:

- математическая модель, отражающая функциональные зависимости геометрических и физических параметров в ячейке разрядного блока электроозонатора от возникновения перенапряжений;

- математическая модель разрядной ячейки, описывающая физические процессы, протекающие в ячейке разрядного блока электроозонатора, с учетом геометрических параметров, влажности и напряженности электрического поля.

- параметры режима обработки биореактора озоном и соответствующие уравнения регрессии.

Теоретическую и практическую значимость работы составляют:

- функциональные зависимости возникновения перенапряжений в ячейке разрядного блока от геометрических и физических параметров, необходимые для включения в состав математических моделей основных физических процессов в электроозонаторе;

- взаимосвязанные математические модели напряженности электрического поля, описывающие физические процессы, протекающие в ячейке разрядного блока электроозонатора;

- компьютерные модели, разработанные в специализированной программной среде Elcut, позволяющие графически определять места перенапряжений и получать рациональные режимы и параметры разрядного блока электроозонатора;

- режимы и параметры электроозонатора, использование которых позволит дезинфицировать биореактор перед засевом новой культуры;

- электротехнологический процесс работы биореактора с использованием озоновоздушной смеси для его дезинфекции перед засевом новой культуры.

- экономическая эффективность технологии дезинфекции биореактора озоном.

Реализация результатов исследований. Результаты исследования имеют весомую практическую значимость как для производства, так и для учебного процесса. В частности, полученные математические и программные модели электроозонирующего устройства и разработанная технология используются в учебном процессе для профессиональной переподготовки и повышения квалификации слушателей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», а также в научных исследованиях института. Практическая значимость исследования для производства заключается в разработке параметров серийно производимого электроозонирующего устройства «Норма-15» на базе ООО МИП «Электротехнологии» и использовании его в технологическом процессе дезинфекции биореакторов на биофабриках ООО «Биота» г. Абинск и ИП Юсупова, Краснодарский край, Каневской р-он, ст. Челбасская.

На защиту выносятся основные положения:

- функциональные зависимости возникновения перенапряжений в электроразрядной ячейке разрядного блока электроозонатора от геометрических и физических параметров этого блока;

- математические модели физических процессов, протекающих в электроразрядной ячейке разрядного блока электроозонатора;

- компьютерные модели разрядного блока электроозонатора и результаты их математической обработки;

- уравнения регрессии и рациональные режимы и параметры электроозонирующего оборудования, использование которых, позволит эффективно дезинфицировать биореактор перед засевом новой культуры;

- электротехнологический процесс работы биореактора с использованием озонородушной смеси для его дезинфекции.

- экономическая эффективность технологии дезинфекции биореактора озоном.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были опубликованы и доложены на Международных научно-практических конференциях: НТТМ (Москва, 2013 год), X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко (2016 год), X национальной научно-практической конференции «Актуальные Проблемы Энергетики АПК» (Саратов, 2019 год), международной научной конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 155-летию РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2-4 декабря 2020 года. Результаты исследований обсуждались на заседаниях кафедры Электроснабжения и электротехники РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева в 2024 г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 24 научных работ, из них 1 в издании, размещенном в БД Scopus, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получены 4 патента РФ. Общий объем публикаций составляет 5,876 печатных листа, из них личный вклад автора – 4,7 печатных листа.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 170 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 36 рисунков, 8 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 165 наименований, в том числе 13 на иностранном языке и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены актуальность, цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор существующих способов дезинфекции биореакторов и устройств для получения озонородушных смесей. Установлено, что для снижения себестоимости продукции производства биофабрик, необходимо применение озонородушных смесей для дезинфекции биореакторов перед засевом новой культуры.

Для поддержания герметичности системы озонатор-биореактор, озонородушная смесь циркулирует по замкнутому контуру.

Рассмотрены исследования процессов, протекающих в электроразрядной ячейке разрядного блока электроозонатора в зависимости от окружающих факторов. Обоснована необходимость определения параметров электроозонатора и режимов работы электротехнологического процесса озонирования биореактора. В соответствии с вышеизложенным определены цель и задачи исследования.

Во второй главе проанализированы параметры различных типов конструкций разрядного блока и определена наиболее эффективная (для пластинчатого разрядного блока) для работы в условиях среды с влажностью более 90 % (Рисунок 1).

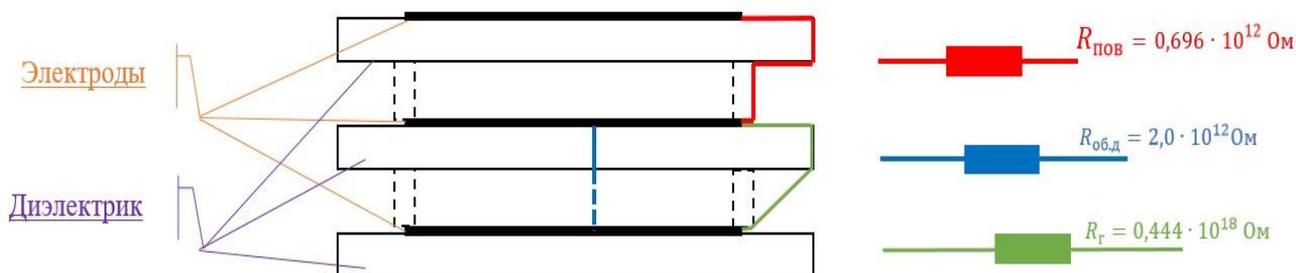


Рисунок 1 – Значения сопротивлений диэлектриков в электроразрядной ячейке пластинчатого разрядного блока (красным цветом изображено поверхностное сопротивление $R_{пов}$; синим – объемное сопротивление диэлектрика $R_{об.д}$; зелёным – сопротивление воздушного промежутка $R_{г}$).

Рассмотрены значения различных типов сопротивлений пластинчатого разрядного блока (измерения были проведены для образца с геометрическими размерами 300 x 200 мм, толщиной твердого диэлектрика 2 мм, воздушного промежутка 3 мм, размерами электрода 270 x 170 мм, при температуре – 20 °С и влажности – 90 %):

$$\begin{cases} R_{об.д} = 2,0 \cdot 10^{12} \text{ Ом} \\ R_{пов} = 0,696 \cdot 10^6 \text{ Ом} \\ R_{г} = 0,444 \cdot 10^{18} \text{ Ом} \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрим электрическую схему замещения барьерный ячейки разрядного блока (Рисунок 2).

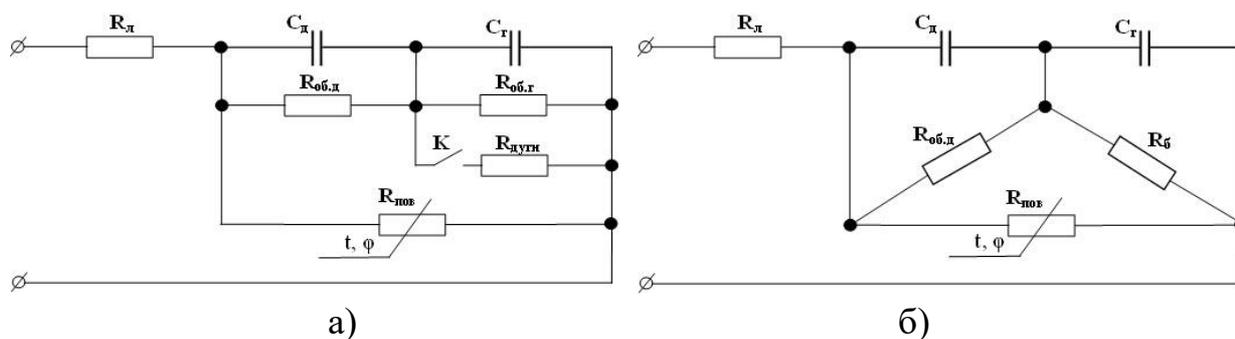


Рисунок 2 – Электрические схемы замещения барьерной ячейки разрядного блока электроозонатора (а – до возникновения дуги б – после возникновения дуги), где: $R_{л}$ – сопротивление линии проводников, $C_{д}$ – емкость диэлектрика, $C_{г}$ – емкость газоразрядного промежутка, $R_{дуги}$ – сопротивление дуги, $R_{об.д}$ – объемное сопротивление диэлектрика, $R_{б}$ – барьерное сопротивление, $R_{пов}$ – поверхностное сопротивление барьерной ячейки разрядного блока, t – температура, φ – влажность

В результате проведенного исследования определено, что наименьшим значением обладает поверхностное сопротивление твёрдого диэлектрика, которое уменьшается с повышением влажности.

Экспериментально определена зависимость удельного поверхностного сопротивления $R_{пов}$ от относительной влажности φ , % воздуха (Рисунок 3).

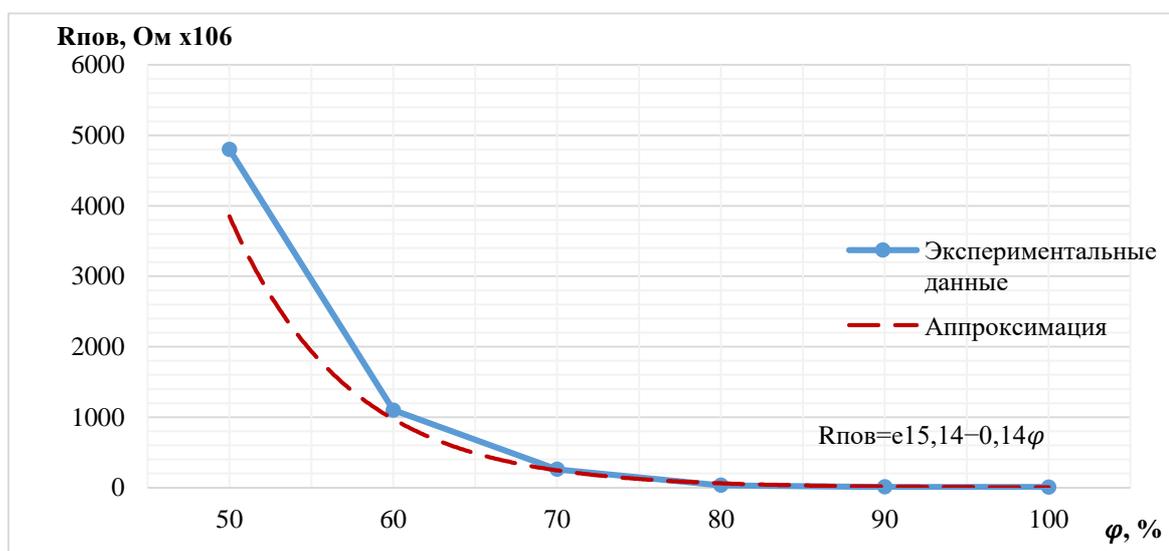


Рисунок 3 – График зависимости удельного поверхностного сопротивления $R_{пов}$ стекла электроозонатора от относительной влажности φ , % воздуха.

Для эффективной работы электроозонатора рассмотрено влияние таких факторов как напряженность поля ёмкость электрического барьера, воздушного промежутка, различных сопротивлений в ячейке разрядного блока, влияющих на максимальную производительность. Получена математическая модель процесса, определяющая влияние параметров разрядного блока на максимально допустимое значение напряженности электрического поля в промежутке:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{max} \leq E_{доп} \\ E_{max} = \sqrt{\frac{4R\omega U_z}{\pi \cdot l^2} \left(\frac{C_{\delta} U}{U_u} - (C_{\delta} + C_n) \right)} \\ R = R_{л} + \frac{(R_{об.д.} + R_{\delta}) \cdot R_{пов}}{R_{об.д.} + R_{\delta} + R_{пов}} \\ R_{пов} = e^{15,14 - 0,14\varphi} \end{array} \right. \quad (2)$$

где E_{max} – максимально допустимая напряженность в промежутке между электродами; $E_{доп}$ – допустимая напряженность электрического поля; l – расстояние между электродами; ω – угловая частота электрического поля; C_{δ} – емкость диэлектрических барьеров электроозонатора; C_n – емкость разрядного промежутка электроозонатора; U_z – напряжение возникновения разряда; U – амплитудное значение напряжения на электроозонаторе; R – сопротивление разрядного промежутка.

Без изучения пространственно-временной структуры барьерного разряда, которая отражает механизм развития электродугового разряда, переходящего в электрический пробой в разрядном промежутке, сложно определить оптимальные параметры разрядной ячейки в условиях повышенной влажности биореактора, позволяющие избежать электрического пробоя диэлектрика. Рассмотрен плоский разрядный промежуток (Рисунок 4) и принято считать процесс одномерным, т.е. не зависящем от поперечных координат. При этом, электрод изолирован от плазмы диэлектриком (стекло, 2 мм) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 6$.

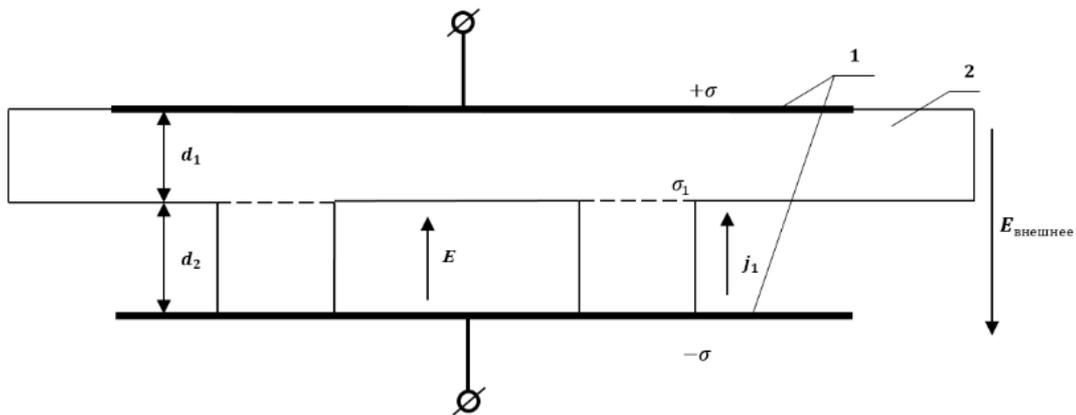


Рисунок 4 – Плоский разрядный промежуток ячейки разрядного блока электроозонатора (1 – электрод, 2 – твердый диэлектрик, d_1 – толщина твердого диэлектрика (стекло), d_2 – толщина воздушного промежутка, $E_{внешнее}$ – напряженность внешнего электрического поля, j_1 – плотность электрического тока, σ – поверхностная плотность заряда).

Наиболее высокая электропроводимость возникает при наличии скользящего разряда, потому необходимо рассмотреть именно поверхностный

разряд с помощью математической модели. В этом случае, необходимые граничные условия будут иметь вид (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_2 d_1 + E_2 d_2 = U \\ E_2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} d_1 + d_2 \right) = U \\ E_2 = \frac{U}{d_2 + d_1 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \\ \varepsilon_2 = f(\varphi) \end{array} \right. \begin{array}{l} x \in (0; d_1) \\ x \in (d_1; d_1 + d_2) \\ d = d_1 + d_2 \\ \varphi \in 80 \div 95\% \end{array} \quad (3)$$

где: $E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1$,

Тогда для расчета потенциала в любой точке ячейки разрядного блока:

$$\varphi(x) = \begin{cases} U - E_2 x, & x \in (0; d_2) \\ U - E_2 d_2 - E_1 x_1, & x \in (0; d_1) \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, можно рассчитать значение напряженности, напряжения и токов смещения в разрядной ячейке.

В третьей главе было проведено исследование (созданное в программной среде Elcut 5.1) модели разрядного блока электроозонатора при напряжении на электродах равном 20 кВ, влажности воздуха более 90%, диэлектрической проницаемости стекла равном 6 и различных расстояниях по поверхности между противоположно заряженными электродами от 45 мм до 65 мм.

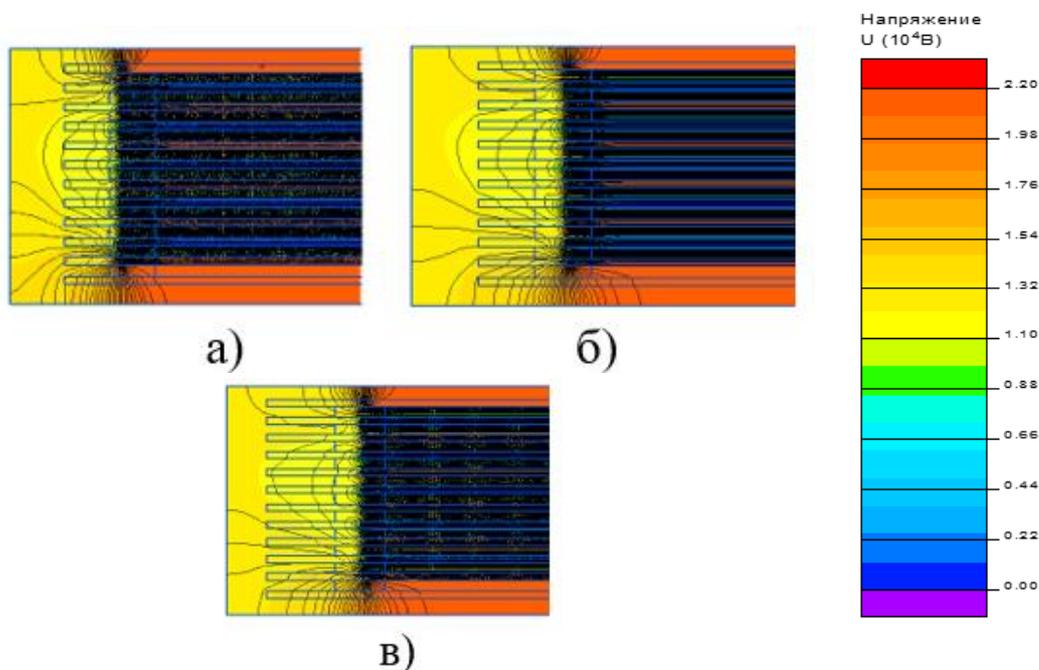


Рисунок 5 – Картина электрического поля части разрядного блока электроозонатора с эквипотенциальными линиями напряженности электрического поля при разных расстояниях по поверхности между электродами (а – 45 мм; б – 55 мм; в – 65 мм)

Из рисунка 5 видно, что при расстоянии по поверхности между электродами в 65 мм линии напряженности поля создают перенапряжения в тех же областях что и на разрядном блоке с расстоянием по поверхности между электродами 45 и 55 мм, но при этом эквипотенциали напряженности электрического поля проходят в областях, не позволяющих возникнуть разности потенциалов на ребрах разрядного блока. Графически это показано на рисунках 6 и 7.

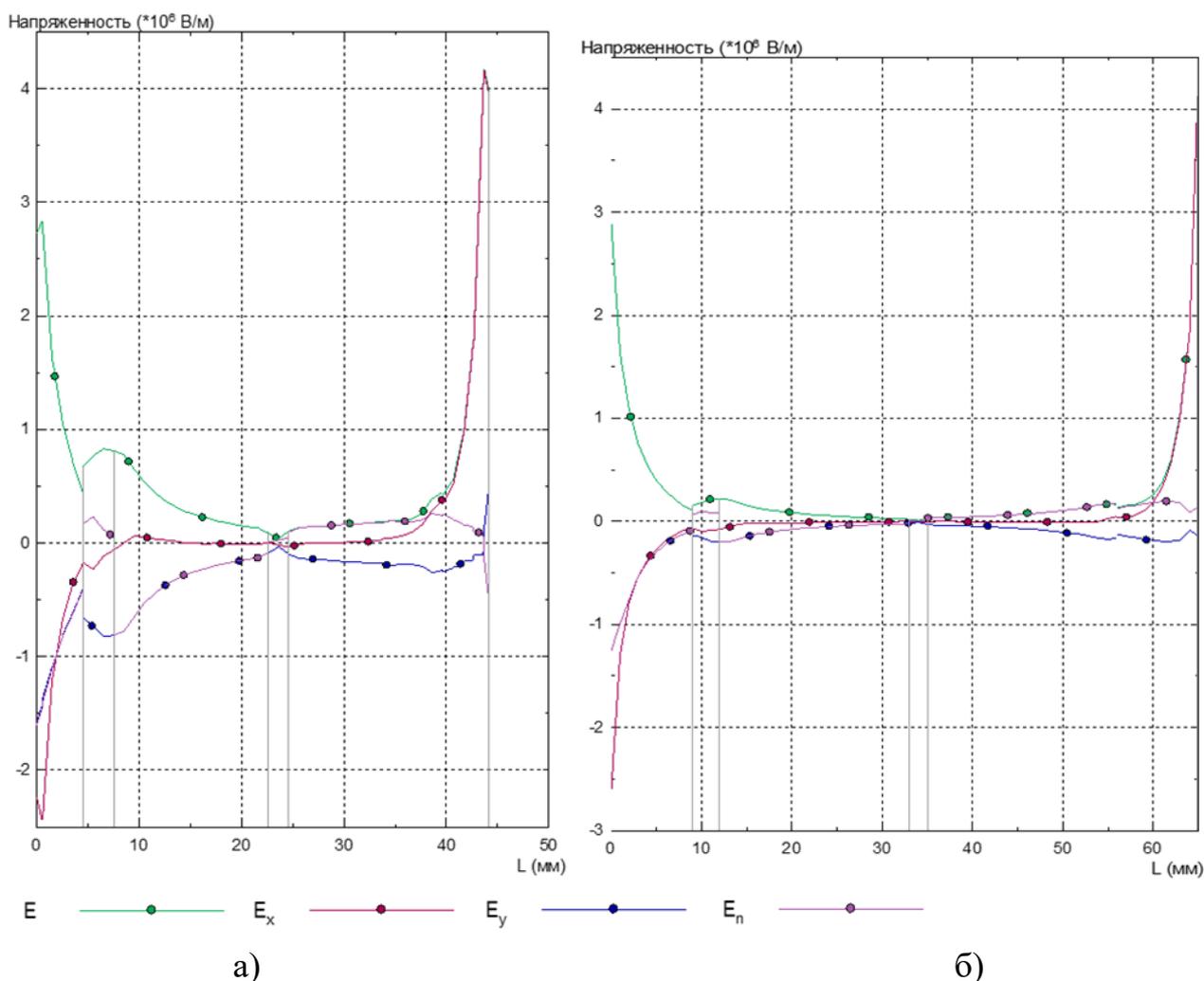


Рисунок 6 – Напряженность электрического поля вдоль контура поверхности стекла от одного электрода до другого при расстоянии (а – 45 мм; б – 65 мм), где E – средняя напряженность электрического поля; E_x – проекция напряженности электрического поля вдоль оси x; E_y – проекция напряженности электрического поля вдоль оси y; E_n – нормальная напряженность электрического поля

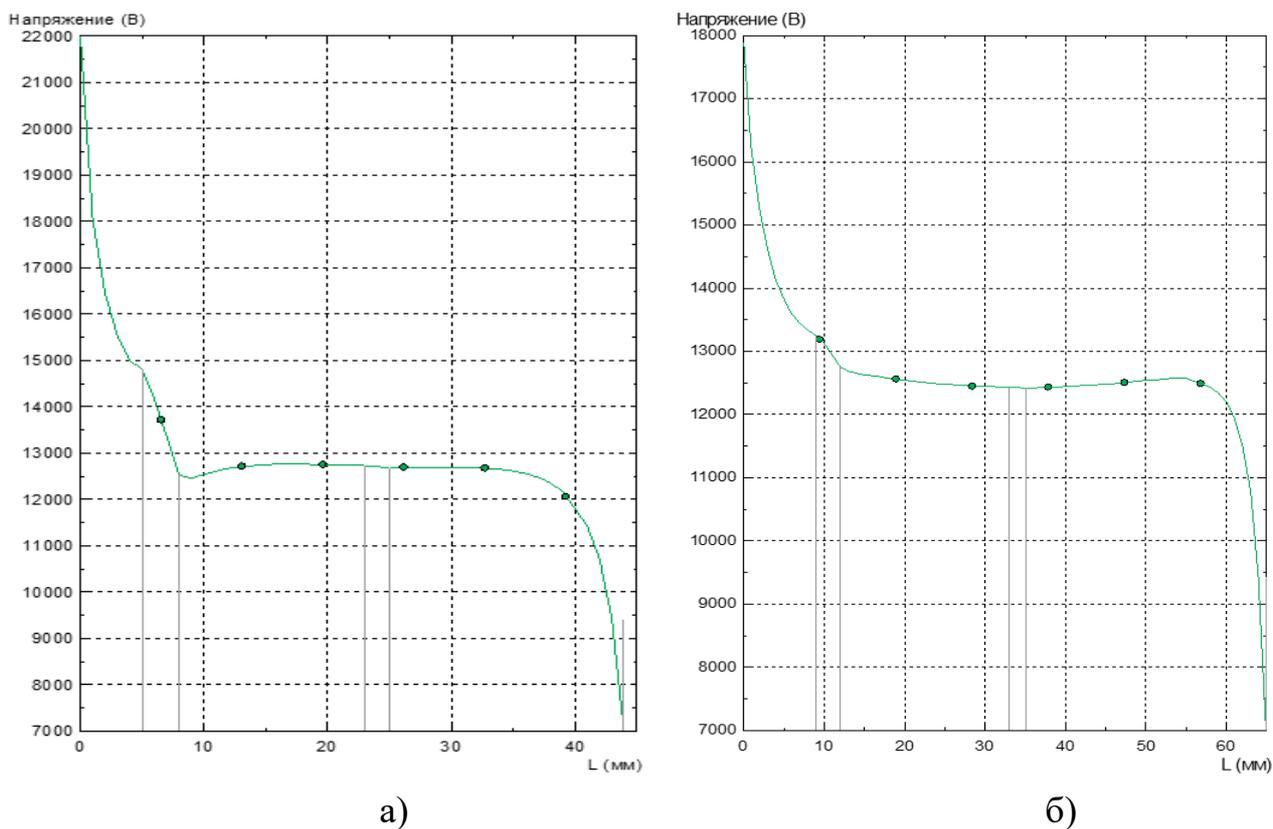


Рисунок 7 – Напряжение вдоль контура поверхности стекла от одного электрода до другого при расстоянии (а – 45 мм; б – 65 мм)

Анализ графиков на рисунке 7 показывает прямо пропорциональное влияние расстояния по поверхности между электродами на разность потенциалов разрядного блока. На рисунках 5 и 6 видно, что расстояния в 65 мм достаточно для предотвращения перенапряжения, возникновения дуговой формы разряда выхода из строя оборудования.

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования технологии применения озоноздушной смеси для дезинфекции биореактора и расчёт ее экономической эффективности.

Рассмотрим принципиальную технологическую схему глубинного культивирования со встроенным в нее электроозонатором (под номером 13 на Рисунке 8):

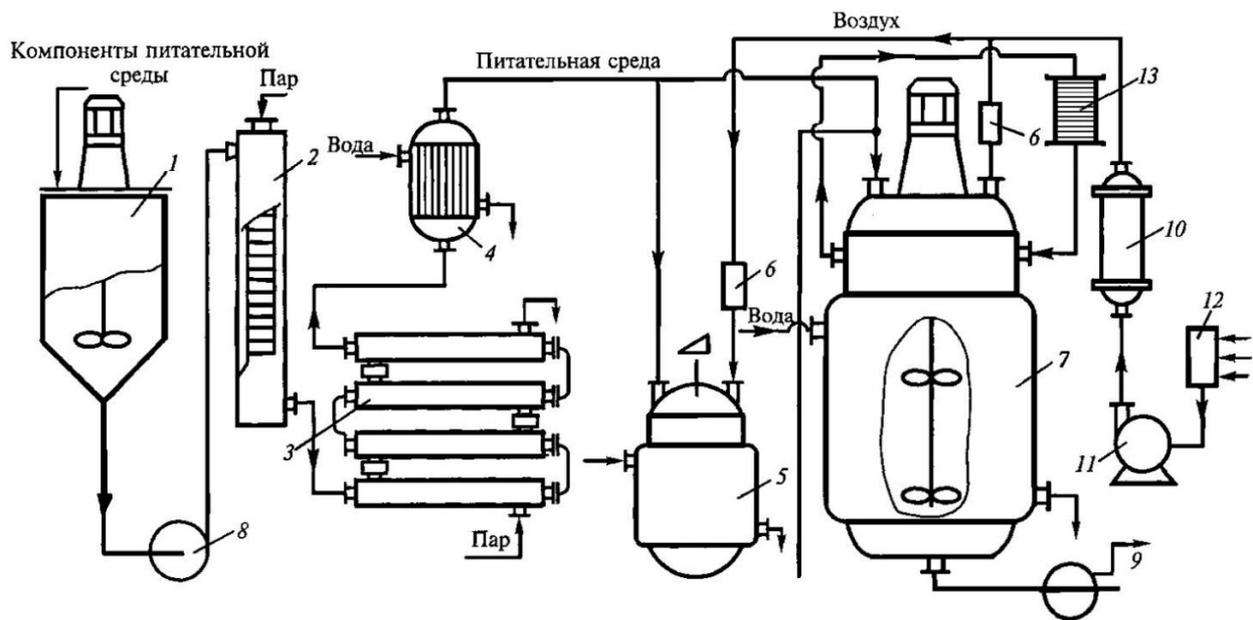


Рисунок 8 – Принципиальная технологическая схема процесса глубинного культивирования микроорганизмов:

1 – смеситель питательной среды; 2 – колонна для непрерывной дезинфекции потока питательной среды острым паром; 3 – теплообменник – выдерживатель; 4 – теплообменник для охлаждения потока питательной среды; 5 – инокуляторы (посевные аппараты); 6 – индивидуальные фильтры для очистки воздуха, подаваемого в инокулятор; 7 – реактор – ферментер; 8,9 – насосы; 10 – масляный фильтр для предварительной очистки воздуха; 11 – компрессор; 12 – головной фильтр для очистки воздуха; 13 – электроозонатор

Программа экспериментальных исследований включала определение количества санитарно-показательной и патогенной микрофлоры в биореакторе. Для этого проводили микробиологические мазки/смывы с внутренних стенок биореактора при различных режимах озонирования. Так как пробы, содержащие микроорганизмы, очень редко содержат такое их количество, которое можно учесть, то для получения достоверных результатов прибегали к разведению образца. Разведение проб осуществлялось в 10-кратных последовательностях с тем, чтобы на поверхность среды в чашке Петри попало 15...300 клеток, образующих колонии. Образцы с нужной плотностью микроорганизмов высевались на питательные среды (питательный агар) для определения коэффициента пророска K_p , % выживших микроорганизмов, который является зависимой переменной y , КОЕ/мл (колониобразующие единицы на миллилитр).

В качестве независимых переменных были использованы: время обработки ($x_1 = 30; 60; 90; 120$ мин) и концентрация озона ($x_2 = 10; 15; 20; 25$ мг/м³). Экспериментальные исследования проводили в соответствии с общепринятыми и частными методиками.

Результаты исследований были обработаны с помощью методов математической статистики в программе «Statistica». По результатам статистического анализа было получено уравнение (6) множественной регрессии, показывающее влияние исследуемых факторов x_1 и x_2 на зависимую переменную и у.КОЕ/мл:

$$y = 8,158 - 0,127 \cdot x_1 - 0,262 \cdot x_2 + 0,0014 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0009 \cdot x_1^2 + 0,0023 \cdot x_2^2 + 0,000002 \cdot x_1^3 \quad (6)$$

где x_1 – время обработки, мин; x_2 – концентрация озона, мг/м³.

По полученному уравнению регрессии в программе построили поверхность влияния зависимости КМАФАнМ (количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов) от времени и концентрации озонородной смеси (Рисунок 9).

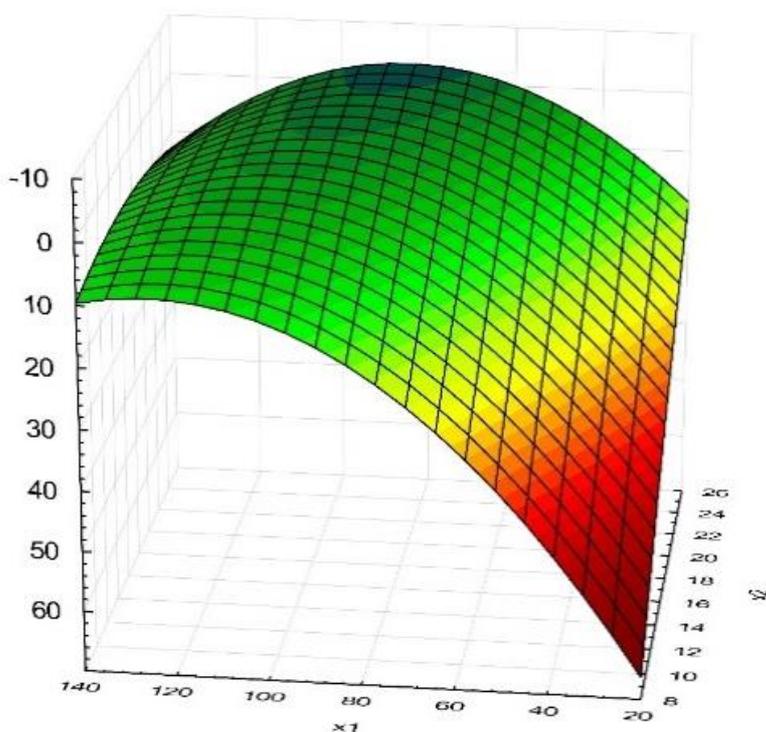


Рисунок 9 – Зависимость КМАФАнМ от времени и концентрации озонородной смеси

Проанализировав рисунок 9, можно сделать вывод, что наиболее приемлемый режим обработки биореактора, для снижения общей обсемененности является концентрация от 20 мг/м³. При времени обработки от 90 до 120 минут уровень снижения обсемененности тогда достигает 0 КОЕ/мл, достигая при этом достаточного уровня. Необходимо отметить, что во всех случаях применения озона для снижения бактерицидной обсемененности

приводит к значительному снижению количества живых бактерий на единицу объема.

Приведены результаты расчета цены электроозонатора для дезинфекции биореактора, а также расчеты экономической эффективности применения на биореакторе объемом 4 м^3 за счет экономии на производстве водяного пара. Чистый дисконтированный доход составил – 27 тыс. руб. Цена одной установки составила 45 тыс. руб. Расчеты получены на основании действующих методик, стандартов и нормативных документов, с учетом среднегодового уровня инфляции.

Электротехнологический процесс дезинфекции биореактора и его алгоритм (Рисунок 10).

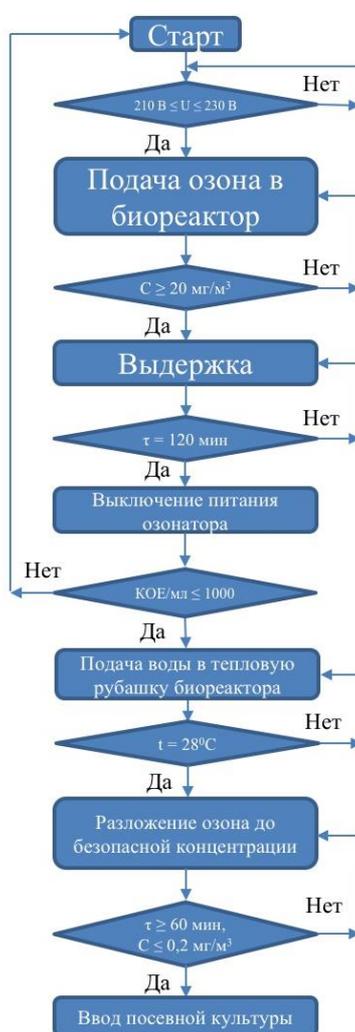


Рисунок 10 – Алгоритм электротехнологического процесса дезинфекции биореактора

1. Перед каждой загрузкой питательной среды биореактор промывается горячей водой, проверяется работа и герметичность его

оборудования. При соблюдении требований к герметичности биореактора и прилегающим коммуникациям начинается его дезинфекция.

2. Включается питание электроозонатора, устанавливаются, требуемые электрические режимы. В биореактор подается озоноздушная смесь с заданными параметрами по трубопроводам. Далее начинается загрузка стерильной питательной среды. Механическое уплотнение биореактора дезинфицируется одновременно с питательной средой.

3. Биореактор выдерживается в течение 120 мин при $t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и концентрации озона $C = 20\text{ мг/м}^3$.

4. По окончании интервала выдерживания происходит отключение питания электроозонатора и прекращается подача озоноздушной смеси. Начинается подача воды через рубашку биореактора для поддержания температуры в биореакторе с $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, совместно с этим для компенсации давления через барботер подается стерильный сжатый воздух.

5. После 60 минут отстоя для разложения озона до безопасных концентраций $C = 0,2\text{ мг/м}^3$ проводится ввод посевной культуры через засевной люк.

6. После засева посевной культуры в аппарате устанавливают оптимальные для ферментации параметры.

7. Продолжительность биосинтеза при посеве составляет ~ 120 ч. По истечению этого срока готовая культуральная жидкость выгружается и передаётся на фильтрацию.

8. По результатам обработки биореакторов, при использовании концентраций озона от 10 до 25 мг/м^3 и временем обработки от 30 до 120 мин, при максимальной концентрации дезинфекция достигается уже при времени обработки от 90 минут; а при времени обработки в 120 мин достаточно концентрации 20 мг/м^3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнительный анализ технологий обеззараживания выявил высокую энергоёмкость паровой дезинфекции биореакторов и подтвердил перспективность применения электроозонирования. Однако применение метода ограничено высокой влажностью обрабатываемой среды более 90 %, что требует оптимизации конструкции разрядного блока.

2. Определено, что минимальное расстояние между электродами по поверхности диэлектрика, исключающее пробой при напряжении 15 кВ, составляет не менее 62 мм при влажности воздуха более 90 %. Это обеспечивает устойчивую генерацию озона без дугового разряда.

3. Математические модели распределения напряженности поля показали, что при влажности более 90 % и напряжении 15 кВ минимальное межэлектродное расстояние в воздушном зазоре должно составлять не менее 5 мм, а толщина диэлектрического барьера — не менее 3 мм. Это предотвращает пробой за счет учета соотношения диэлектрических проницаемостей стекла и воздуха.

4. Экспериментально определены оптимальные режимы дезинфекции: концентрация озона 20 мг/м³ и время экспозиции 90...120 минут обеспечивают снижение обсемененности биореакторов до уровня $K \leq 0,1$ %. Уравнение регрессии подтвердило значимость этих параметров для эффективного обеззараживания биореактора.

5. Разработанный процесс электроозонной дезинфекции биореактора характеризуется низкими энергозатратами (0,8 кВт·ч), что в 90 раз меньше, чем при использовании паровой стерилизации (72 кВт·ч), при сохранении эффективности биотехнологического процесса.

6. Экономическая оценка доказала рентабельность технологии: чистый дисконтированный доход составляет 27 тыс. руб./год на тонну продукции за счет сокращения энергопотребления и сохранения качества биомассы.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования и рекомендации:

Планируется дальнейшее проведение исследований режимов работы и параметров электроразрядного блока электроозонатора во влажной среде и с высоким содержанием органических веществ и доработка созданных моделей. В модели предполагается учесть влияние природы материала твёрдого диэлектрика на его гидрофобность и электрическую прочность.

Основные положения диссертации опубликованы

Издания, индексируемые в Scopus и Web of Science:

1. Does ozone treatment of maize seeds influence their germination and growth energy? / D. Normov, E. Chesniuk, A. Shevchenko, T. Normova, R. Goldman, T. Bohinc, S. Trdan // Acta agriculturae slovenica. – 2019. – № 114/2. – С. 251-258.

Издания, рекомендованные ВАК РФ:

2. Пожидаев, Д. В. Баланс озона при детоксикации фуражного зерна / Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2013. – № 10 (094). – С. 180-195.

3. Пожидаев, Д. В. Определение производительности установки для электроозонирования семян / Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 10. – С. 35-36.

4. Анализ эффективности применения электротехнологий в сельскохозяйственном производстве / Д. А. Нормов, Р. В. Волов, Н. С. Левшакова, П. П. Паршинцев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2015. – № 113(09). – С. 43-55.

5. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян / Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев, Р. В. Волов, Д. С. Чижов, В. П. Тимофеев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2015. – № 112. – С. 1438-1451.

Патенты РФ:

6. Патент № 2479185 С1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00, А01N 25/02, А01N 31/00. Способ стимулирования роста кукурузы в условиях защищенного грунта для селекционных целей : № 2011132898/13 : заявл. 04.08.2011 : опубл. 20.04.2013 / Д. А. Нормов, Т. Н. Полутина, Т. А. Нормова [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет».

7. Патент № 2580726 С1 Российская Федерация, МПК В04С 9/00, В04С 5/08, В07В 7/08. Аэроциклон : № 2014147254/05 : заявл. 30.12.2014 : опубл. 10.04.2016 / Д. А. Нормов, Г. В. Дегтярев, Д. В. Пожидаев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет».

8. Патент № 2546015 С1 Российская Федерация, МПК А61L 9/015. Способ обеззараживания животноводческих помещений от возбудителей эшерихиоза : № 2014108458/15 : заявл. 04.03.2014 : опубл. 10.04.2015 / В. И.

Терехов, Д. А. Нормов, И. В. Сердюченко [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет».

9. Патент № 2688610 С1 Российская Федерация, МПК С02F 9/08, С02F 1/24, С02F 1/38. Способ очистки навозных стоков : № 2018124118 : заявл. 02.07.2018 : опубл. 21.05.2019 / А. А. Азарян, Д. А. Нормов, М. Д. Нормова [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

В прочих изданиях:

10. Пожидаев, Д. В. Баланс поглощения озона при детоксикации зерна / Н. Н. Курзин, Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев // Информационно-управляющие системы в АПК: материалы международного научно-практического семинара, посвящённого 90-летию профессора Сергованцева В.Т. – 2012. – С. 39-41.

11. Пожидаев, Д. В. Определение факторов, влияющих на производительность электроозонатора / Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев, Д. А. Добровольский // Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием. Под общ. ред. Трушкина В.А. – 2019. – С. 161-162.

12. Пожидаев, Д. В. Распределение озона внутри семени / Д. В. Пожидаев, Е. А. Федоренко, Ю. Г. Красноружев // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Материалы V всероссийской научно-практической конференции молодых ученых Краснодар, 22-24 ноября 2011 г. – С. 473-475.

13. Пожидаев, Д. В. Снижение бактерицидной обсемененности в животноводческих помещениях электроозонированием в присутствии животных / Д. В. Пожидаев // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях : сборник докладов Пятой Международной научно-практической конференции. Москва 26-28 июня 2013: МИСИ-МГСУ – С. 451-455.

14. Применение озона в агробιοтехнологии / Д. В. Пожидаев, П. П. Паршинцев, А. А. Азарян, А. А. Напольских // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И.С. Косенко 29-30 ноября 2016 г. – Краснодар : КубГАУ. – С. 1316-1317.

15. Пожидаев, Д. В. Разработка схемы питания генератора озона с возможностью регулирования частоты тока / Д. В. Пожидаев // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (26-28 ноября 2013 г. и 2-4 декабря 2014 г.). – С. 528-529.

16. Пожидаев, Д. В. Типы и конструкции генераторов озона для аграрного производства / Д. В. Пожидаев, М. О. Беловолов, Н. С. Левшакова // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (2-4 декабря 2014 г.). – С. 447-448.

17. Pozhidaev, D. V. Air ozonation in cattle breeding / D. V. Pozhidaev, D. A. Normov, A. A. Shevchenko, E. E. Chesnyuk // Fundamental and applied sciences today IV (Vol. 3). North Charleston, USA. 20-21 October 2014. – С. 146-151.

18. Pozhidaev, D. V. The ozone-air mixture impact on harmful microflora in the forage / D. V. Pozhidaev, A. E. Sulejmanov // Fundamental science and technology – promising developments IV (Vol. 2). North Charleston, USA. 29-30 September 2014. – С. 134-137.

19. Pozhidaev, D. V. Ozonation for decontamination of aeration emission of the treatment facilities / D. V. Pozhidaev, V. S. Boyko // Fundamental science and technology – promising developments IV (Vol. 2). North Charleston, USA. 29-30 September 2014. – С. 127-130.

20. Эмпирическая зависимость поглощения озона для дезинфекции фуражного зерна / Д. А. Нормов, А. Э. Сулейманов, Д. В. Пожидаев, К. А. Тлеуз // Научная дискуссия: инновации в современном мире : сборник статей XLVI международной научно-практической конференции. – 2016. – № 2 (45).

21. Пожидаев, Д. В. Электроозонная обработка земляники садовой / Д. В. Пожидаев, А. А. Азарян, Д. А. Подповетная // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко (2930 ноября 2016 г.) С. 1210-1211.

22. Пожидаев, Д. В. Влияние озоновоздушной смеси на посевные качества семян гибридов кукурузы / Д. В. Пожидаев, Д. А. Нормов, А. А. Шевченко // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2018. – Т. 3, № 2. – С. 11-19.

23. Пожидаев, Д. В. Повышение эффективности пластинчатых электроозонаторов / Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев, Д. А. Добровольский // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием. Подред. Трушкина В.А. – Саратов, 2019. – С. 163-165.

24. Пожидаев, Д. В. Электроозонная технология стерилизации реактора-ферментера / Д. В. Пожидаев, Д. А. Нормов // Доклады ТСХА : сборник статей. – Выпуск 293. Часть III. – 2021. – С. 100-103.