

На правах рукописи

Болотин Владимир Леонидович

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООЗОНАТОРОВ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВКИ ВЫРАЩИВАНИЯ  
МИКРОВОДОРОСЛИ

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и  
энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И. А. Будзко Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени Г. А. Тимирязева»

Научный руководитель **Нормов Дмитрий Александрович**,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
электроснабжения и теплоэнергетики имени  
академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО РГАУ –  
МСХА имени К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Лекомцев Петр Леонидович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой энергетики и  
электротехнологии ФГБОУ ВО Удмуртский  
ГАУ

**Мануйленко Александр Николаевич**,  
кандидат технических наук, старший  
преподаватель Инженерного факультета  
ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

Ведущая организация ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ

Защита состоится 18 июня 2026 года 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](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях развития агропромышленного комплекса России особое значение приобретает импортозамещение и повышение эффективности животноводства за счет использования высококачественных кормовых добавок. Одной из таких добавок является суспензия микроводоросли хлореллы (*Chlorellavulgaris*), богатая полноценным белком, незаменимыми аминокислотами, витаминами и биостимуляторами. Её применение в рационах крупного рогатого скота, свиней и птицы позволяет увеличить продуктивность на 15...40 % и снизить падеж молодняка. Однако промышленное культивирование хлореллы сдерживается высокой энергоемкостью традиционных технологий, прежде всего из-за необходимости интенсивного искусственного освещения (потребление электроэнергии составляет 7...11 кВт·ч в сутки на одну осветительную панель). По данным Министерства сельского хозяйства РФ, себестоимость получаемой суспензии остается высокой, что ограничивает её массовое применение.

Существующие способы интенсификации роста хлореллы – повышение температуры, подбор питательных сред, добавление химических катализаторов (марганец, аммиачная селитра, углекислый газ) – либо не дают значительного эффекта, либо ведут к накоплению вредных веществ в биомассе и ухудшают экологическую чистоту продукции. В связи с этим актуальной является разработка энергоэффективных и экологически безопасных электротехнологий, позволяющих увеличить выход биомассы без существенного роста затрат. Перспективным направлением представляется обработка суспензии озоновоздушной смесью, получаемой в электроозонаторе. Озон, являясь сильным окислителем и быстро разлагаясь до кислорода, может оказывать стимулирующее действие на клетки микроорганизмов при оптимальных дозах. Однако для реализации этой технологии необходимо определить параметры электроозонатора и режимы обработки, обеспечивающие требуемый эффект при сохранении жизнеспособности культуры.

**Степень разработанности темы.** Вопросам повышения эффективности работы электроозонирующих устройств в условиях сельскохозяйственного производства и технологиям применения электроозонирования посвящены труды Бородина И. Ф., Ксенза Н.В., Загинайлова В.И., Лекомцева П.Л., Андреева С.А., Сторчевого В. Ф., Самарина Г.Н., Нормова Д.А., Оськина С.В., Суховского Н.С., Мануйленко А.Н., Овсянникова Д.А., Шевченко А.А. и других ученых. Однако режимы работы электроозонирующих устройств, в условиях дозированного расхода воздуха изучены не полностью, как и стимуляция ростовых процессов микроводоросли электроозонированием.

**Цель работы:** определение эффективных параметров разрядного блока электроозонатора и технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы.

**Объект исследований:** режимы работы разрядного блока электроозонатора и технологический процесс электроозонной обработки микроводоросли хлореллы.

**Предмет исследования:** параметры и зависимости, характеризующие работу разрядного устройства электроозонатора и технологический процесс электроозонной обработки микроводоросли хлореллы.

**Задачи исследований:**

1. Выполнить анализ существующих методов и технических средств стимуляции ростовых процессов микроводоросли, а также определить необходимые требования разрядного блока электроозонатора для условий работы в изолированной системе.

2. Разработать математическую модель тепловых электрических процессов разрядного блока электроозонатора для условий работы в изолированной системе.

3. Экспериментально определить параметры озоновоздушной обработки суспензии хлореллы для увеличения прироста концентрации и оптической плотности клеток микроводоросли.

4. Произвести технико-экономическое обоснование применения электроозонирования для стимулирования роста клеток хлореллы.

**Методы исследования:** в работе использованы основы теории электротехнологии, термодинамики, техники высоких напряжений, методика полевого эксперимента, теория планирования эксперимента, методы теории вероятности и математической статистики, программное обеспечение STATISTICA 6.0, MicrosoftOffice.

**Научная новизна работы:**

1. Математическая модель тепловых электрических процессов электроразрядного блока озонатора для условий работы в изолированной системе.

2. Эффективные параметры обработки при электроозонировании, позволяющие увеличить концентрацию и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы.

3. Регрессионные модели влияния концентрации озона в озоновоздушной смеси, продолжительность воздействия, количества обработок на концентрацию клеток и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы.

**Практическую значимость работы составляют:**

– результаты математического моделирования тепловых электрических процессов при работе электроразрядного блока озонатора.

– результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, позволяющих определить концентрацию озона, продолжительность воздействия и периодичность обработки суспензии хлореллы, позволяющих увеличить концентрацию клеток и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы.

**Реализация результатов исследований.** Лабораторные исследования проводились в аккредитованной учебно-научной испытательной лаборатории РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, результаты исследований внедрены в технологический процесс культивирования микроводоросли хлореллы на предприятии ИП «А. В. Трифонов» (Краснодар, Национальный центр зерна им П. П. Лукьяненко).

**На защиту выносятся основные положения:**

– Математическая модель тепловых электрических процессов электроразрядного блока озонатора, для условий работы в изолированной системе.

– Результаты экспериментальных исследований, определяющие в зависимости от концентрации озона, продолжительность воздействия и периодичность обработки суспензии хлореллы, позволяющие увеличить концентрацию клеток и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы.

– Регрессионные модели влияния концентрации озона, времени обработки и количества обработок на концентрацию клеток и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских научных конференциях, круглых столах и конкурсах:

– Научно-практическая конференция «Чтения академика В. Н. Болтинского», посвященная 90-летию Шарова Николая Михайловича, г. Москва, Россия, 23-24 октября 2024 года;

– Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии, г. Москва, 2-4 июня 2025 г.;

– Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации» / Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского. – Балашиха: Университет Вернадского, 2025.

– Международная научно-техническая конференция «Энергообеспечение АПК», посвящённая 105-летию плана ГОЭЛРО, 160-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 95-летию МИМЭСХ и 95-летию ГНУ ВИЭСХ г. Москва, Россия, 23-24 октября 2025 г.;

– Международный постоянно действующий научно-практический семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» г. Москва, Россия, 28-29 января 2026 года;

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 3 в изданиях из перечня ведущих периодических изданий, определенных ВАК РФ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 1 патенте на изобретение. Общий объем публикаций составляет 1,71 печатных листа, из них личный вклад автора – 1,4 печатных листа.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемых источников и 2-х приложений. Работа содержит 129 страниц основного текста, 39 рисунков, 14 таблиц. Список используемых источников содержит 150 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и публикациях.

**В первой главе** выполнен подробный анализ современных методов повышения продуктивности микроводоросли хлореллы. Рассмотрены влияние температуры, интенсивности перемешивания, химических катализаторов, искусственного освещения и площади посева. Показано, что химические методы, будучи достаточно эффективными, могут приводить к накоплению вредных веществ в биомассе и не являются экологически чистыми. Традиционная биотехнология выращивания хлореллы на среде Тамия с использованием мощных светодиодных облучателей (мощностью 300...450 Вт) требует значительных энергозатрат.

Проведен обзор электрофизических методов стимуляции сельскохозяйственных культур и микроорганизмов: воздействие электрическими и магнитными полями, электрохимически активированными растворами, озоном. Отмечено, что использование озона является перспективным благодаря его высокой окислительной способности и экологической безопасности (продукт распада – кислород). Приведены данные положительного влияния озона на всхожесть семян, рост растений, а также

предварительные результаты обработки микроводоросли, которые показали эффективность озонирования, но выявили проблему перегрева озоновоздушной смеси.

Выполнен анализ существующих конструкций генераторов озона: трубчатого, пластинчатого, игольчатого типов. Установлено, что для обозначенных целей приемлемо использовать плоскую пластинчатую систему электроразрядного устройства, однако при рассмотрении возможности применения такого озонатора для продувки жидких сред необходимо учитывать теплофизические аспекты процесса. В условиях работы изолированной системы по воздушной среде, когда озоновоздушная смесь, при повышенном давлении, подается непосредственно в жидкость, разрядная камера недостаточно охлаждается. Объем прокачиваемого через разрядный промежуток воздуха (выступающего в роли теплоносителя) зачастую невелик, и его теплоемкости недостаточно для эффективного отвода тепла разряда. В результате температура в зоне разряда и, соответственно, на выходе из генератора стремительно возрастает, преодолевая порог в 35–40 градусов Цельсия. При достижении таких температур резко интенсифицируются процессы термического распада (рекомбинации) озона. Константа скорости разложения увеличивается настолько, что результирующая концентрация озона в газовом потоке падает, значительно снижая производительность установки. Именно для случая барботажа жидких сред проблема перегрева разрядного устройства стоит наиболее остро. Следовательно – необходимо разработать электроозонирующее устройство достаточной, для данного технологического процесса, производительности и допустимой температурой нагрева воздушной среды (до 30 °C), при условии работы в изолированной системе.

Вопросы термостабилизации и конструктивной оптимизации малых озонаторов для работы в замкнутых газожидкостных контурах изучены к настоящему времени явно недостаточно. Это является сдерживающим фактором, препятствующим широкому внедрению озонных технологий в практику сельскохозяйственной биотехнологии, в частности, для стимуляции роста микроводорослей.

**Во второй главе** представлены теоретические исследования, направленные на обоснование параметров электроозонатора и системы подачи озоновоздушной смеси.

Разработана схема технологического процесса электроозонной обработки хлореллы (Рисунок1). Процесс включает: подготовку питательной среды, засев маточной культурой, подачу воздуха компрессором, генерацию озона в разрядном блоке, подачу озоновоздушной смеси через диффузоры в емкости с суспензией, искусственное освещение для фотосинтеза. Ключевым требованием

является поддержание температуры питательной среды в оптимальном диапазоне 28–30°C, что накладывает ограничение на температуру вносимой озонозооной смеси.

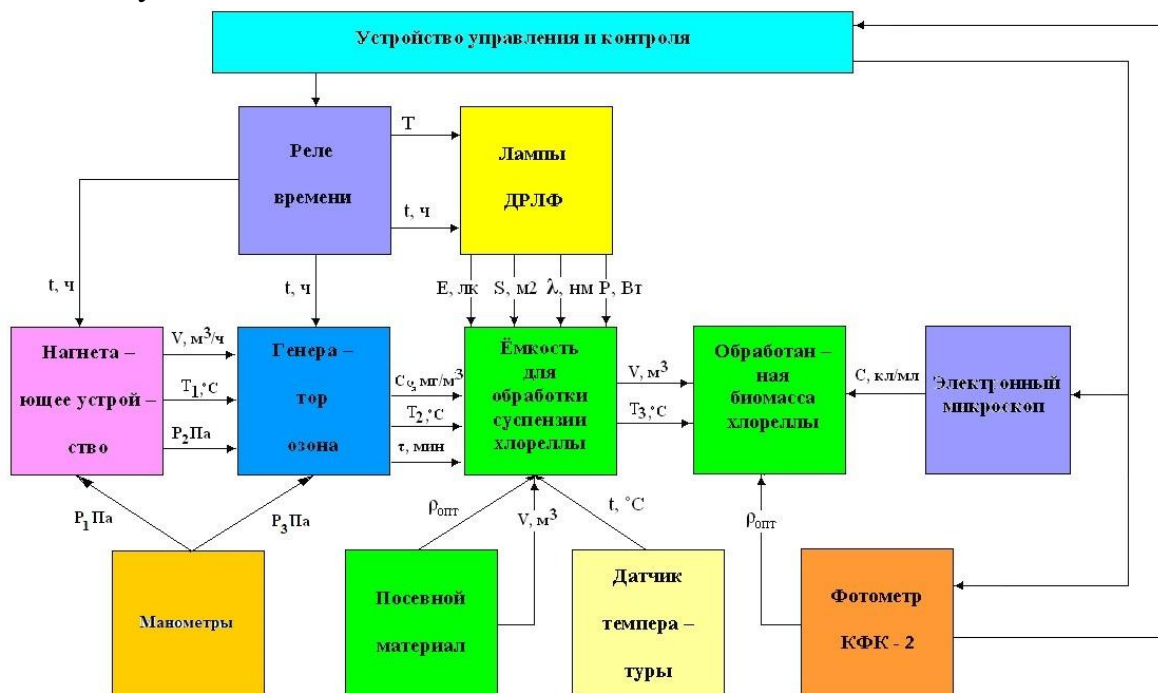


Рисунок 1 – Схема технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы

Для анализа тепловых процессов в разрядной ячейке при условиях работы в изолированной системе (ограниченный расход воздуха) рассмотрен стационарный режим течения воздуха со скоростью  $u$  через плоский канал длиной  $L$  и площадью сечения  $S$  (Рисунок 2).

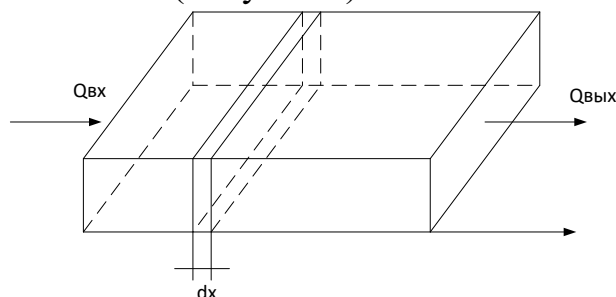


Рисунок 2 – воздушный поток, проходящий через разрядный промежуток.

Выделен элементарный объем  $dV = S \cdot dx$ . Составлено уравнение теплового баланса.

$$Q_{BX}(x) - Q_{ВЫХ}(x + dx) = P_1 + P_2 - P_3 \quad (1)$$

где:  $Q_{BX}(x)$  – тепловой поток или энергия входящая в объем;  $Q_{ВЫХ}(x+dx)$  – тепловой поток или мощность, выходящая из рассматриваемого объема;  $P_1$  –

мощность разряда, выделяемая в рассматриваемом объеме;  $P_2$  – мощность выделяемая в объеме;  $P_3$  – потери тепла через стенки канала.

Получено дифференциальное уравнение первого порядка для температуры  $T(x)$ .

$$\rho \cdot u \cdot S \cdot c_p \frac{dT}{dx} = P_p(x) \cdot S - \Delta H \cdot v(x) \cdot S - \lambda \cdot \Pi \cdot (T_1(x) - T_{CT}) \quad (2)$$

Приведем уравнение к виду:

$$\frac{dT}{dx} + \alpha \cdot T(x) = \beta \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{\lambda \Pi}{\rho \cdot u \cdot S \cdot c_p}; \beta = \frac{P_p(x) - \Delta H \cdot v(x)}{\rho \cdot u \cdot S \cdot c_p} + \alpha T_{CT}.$$

где:  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – линейная скорость газа, м/с;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг К);  $T(x)$  – температура воздуха, К;  $S$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $P_p$  – мощность электрического разряда на единицу объема, зависящая от температуры и плотности озонородушной смеси, Вт/м<sup>3</sup>;  $v(x)$  – скорость реакции или изменение концентрации озона, моль/(м<sup>3</sup>с);  $\Delta H$  – изменение энтальпии или теплоты реакции синтеза озона, Дж/моль;  $\lambda$  – коэффициент теплопередачи стенок канала, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\Pi$  – периметр канала по которому движется озонородушная смесь, м;  $T_1(x)$  – температура на входе в газоразрядный промежуток, К.

Его решение (3) показывает экспоненциальный рост температуры от входной  $T_0$  до установившегося значения  $T_{уст}$ .

$$T(x) = \frac{\beta}{\alpha} + \left( T_0 - \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{-\alpha x} \quad (3)$$

Установившаяся температура определяется выражением (4) и зависит от удельной мощности разряда, скорости газа и интенсивности теплоотвода.

$$T_{уст} = \frac{(P_p - \Delta H \cdot v(x)) S}{\lambda \Pi} + T_{CT} \quad (4)$$

Ключевым результатом является определение критической удельной мощности разряда  $P_p = 20$  кВт/м<sup>3</sup>, при которой температура на выходе разрядного промежутка длиной 0,5 м не превышает 30°С при скорости газа 0,3 м/с.

Далее рассмотрена динамика изменения концентрации озона по длине газоразрядного промежутка и установлены влияющие, на этот процесс, параметры.

Скорость синтеза озона зависит от мощности электрического разряда и концентрации кислорода

$$v_{\text{синтеза}} = k_1 (P_p) \cdot (n_{O_2}) \cdot \eta(T) \quad (5)$$

где  $k_1(P_p)$  – константа скорости синтеза, зависящая от мощности разряда;  
 $n_{O_2}$  – концентрация кислорода;  
 $\eta(T)$  – температурный коэффициент эффективности;  
 $m$  – порядок реакции ( $m=1$ ).

$$k_1(P_p) = \alpha \cdot P_p \cdot e^{-\frac{\beta}{P_p}} \quad (6)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – эмпирические константы.

Скорость распада озона

$$v_{\text{распада}} = k_2(T) \cdot (n_{O_3})^q + k_3(T_e) n_{O_3} \cdot n_e \quad (7)$$

где  $k_2(T)$  – константа термического распада;  
 $k_3(T)$  – константа электронного распада;  
 $n_{O_3}$  – концентрация озона;  
 $n_e$  – концентрация электронов;  
 $q$  – порядок реакции ( $q=1$ ).

С учетом закона Аррениуса для термического распада и второго слагаемого, учитывающего плазмохимический разряд, получаем

$$k_2(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} + B \cdot \frac{P_p}{1 + C \cdot P_p} \cdot e^{-\frac{\Delta}{T}} \quad (8)$$

где  $E_a = 20-30$  кДж/моль – энергия активации распада.

В результате, получаем дифференциальное уравнение

$$u \cdot \frac{dn}{dx} = k_1 \cdot P_p \cdot (n_{O_2}) \cdot \eta(T) - k_2(T) \cdot (n_{O_3}) - k_3(T_e) n_{O_3} \cdot n_e \quad (9)$$

Левая часть, полученного уравнения определяет изменение концентрации вдоль длины разрядного промежутка. Чем выше скорость газа, тем медленнее рост концентрации. Если учитывать только термический распад, то уравнение примет следующий вид

$$u \cdot \frac{dn}{dx} = k_1 \cdot P_p \cdot (n_{O_2}) - k_2(T) \cdot (n_{O_3}) \quad (10)$$

$$\frac{u}{k_2(T)} \cdot \frac{dn}{dx} + n_{O_3} = \frac{k_1 \cdot P_p \cdot (n_{O_2})}{k_2(T)}$$

Решая данное уравнение, получим функцию изменения концентрации озона вдоль разрядного промежутка (11) и график изменения концентрации вдоль разрядного промежутка (Рисунок 2).

$$n(x) = \frac{k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2})}{k_2} \left( 1 - e^{-\frac{k_2 x}{u}} \right) \quad (11)$$

где:  $k_1$  – константа скорости синтеза;  $k_2$  – константа термического распада;  $k_3$  – константа электронного распада;  $n_{O_3}$  – концентрация озона;

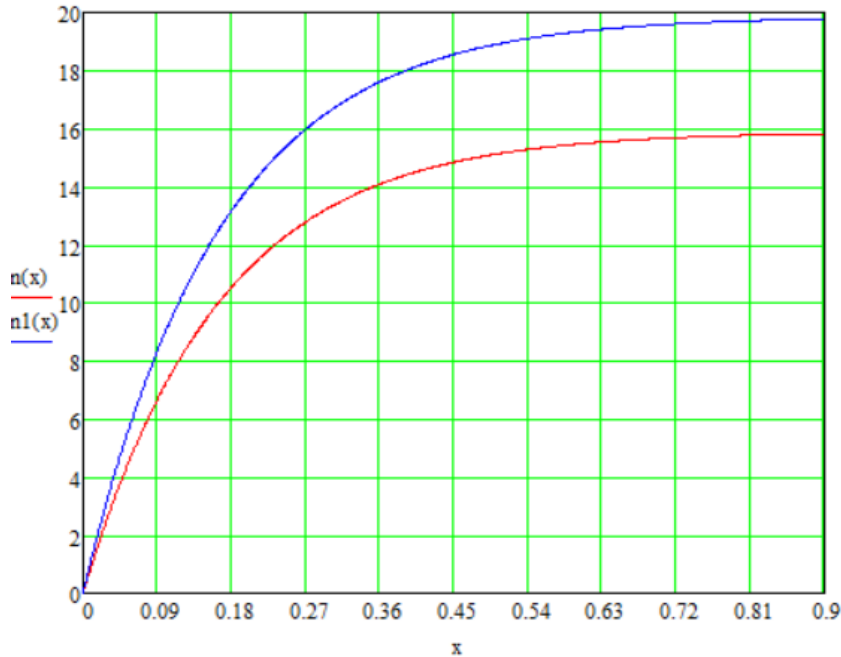


Рисунок 3 – Изменение концентрации озона в газоразрядном промежутке

Соответственно, если увеличивать концентрацию озона на выходе газоразрядного промежутка, за счет увеличения мощности электрического разряда, то температура по рисунку 3 превышает  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что является недопустимым значением для технологического процесса. Получаем, что в нашем случае мощность электрического разряда равна  $20\text{ кВт/м}^3$ . Эта величина соответствует требованиям технологического процесса и заданным условиям.

В результате проведенного анализа процессов разрядного промежутка, получена система уравнений, совмещающая термодинамические и электрические параметры и описывающая процессы, происходящие в газоразрядной ячейке озонатора.

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} + \alpha \cdot T(x) = \beta \\ u \cdot \frac{dn}{dx} = k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2}) - k_2(T) \cdot (n_{O_3}) \end{cases} \quad (12)$$

Решение системы уравнений (теплового и кинетического) (12) позволило увязать электрические параметры с выходными характеристиками:

$$\begin{cases} T(x) = \frac{\beta}{\alpha} + \left(T_0 - \frac{\beta}{\alpha}\right) e^{-\alpha x} \\ n(x) = \frac{k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2})}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2 x}{u}}\right) \end{cases} \quad (13)$$

Температура на выходе газоразрядного промежутка и концентрация озона зависят от мощности электрического разряда, которая определяется

$$P_P = \frac{T_{уст} \cdot \lambda \cdot \Pi + \Delta H \cdot v(x) \cdot S - \lambda \cdot \Pi \cdot T_{ст}}{S} \quad (14)$$

где  $v(x)$  – скорость реакции или изменение концентрации озона, моль/(м<sup>3</sup>с);  
 $\Pi$  – периметр канала, по которому движется озоновоздушная смесь, м;

Определены параметры питающего сигнала для обеспечения необходимой производительности (15 г/ч) при заданном ограничении по температуре. Для барьерного разряда с плоскими электродами и напряжением 10 кВ, требуемая средняя мощность достигается при частоте следования импульсов 500 Гц и их длительности 57,6 мкс.

С целью определения параметров воздушного потока, проходящего через разрядную ячейку электроозонатора был проведен аэродинамический расчет системы подачи озоно-воздушной смеси (Рисунок 4).

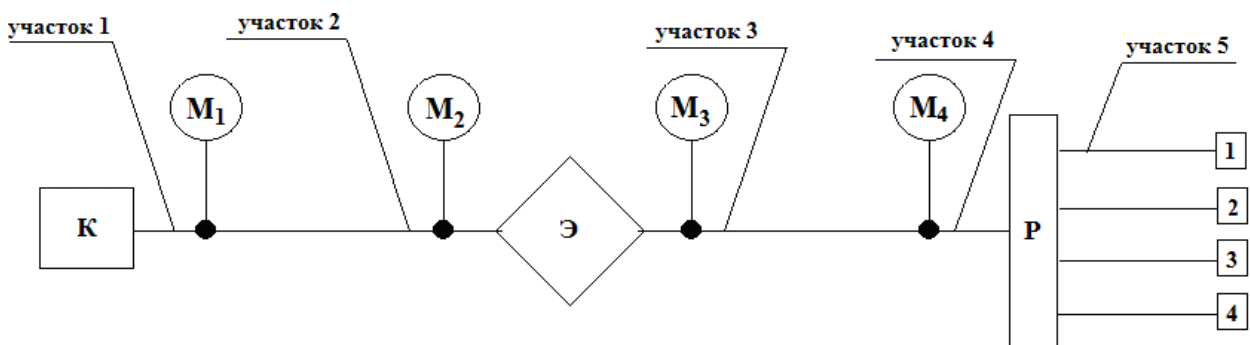


Рисунок 4– Схема электроозонной установки с расчётными участками

С использованием формул Дарси-Вейсбаха и Вейсбаха (15, 16) определены потери давления на трение и местных сопротивлениях для трех расчетных участков.

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \rho \quad (15)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, который определяется в зависимости от режима движения озоновоздушной смеси;  $L$  – длина

трубопровода, м;  $v$  – средняя скорость движения озоноздушной смеси, м/с;  $\rho$  – плотность озоноздушной среды при температуре 20 °С кг/м<sup>3</sup>;

$$\Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2} \rho \quad (16)$$

где  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

В результате проведенного гидравлического расчета определены суммарные потери давления по полной длине магистрали с учетом местных сопротивлений. В соответствии с заданной производительностью  $Q=100$  л/мин и вычисленному давлению  $\Delta p=5474,7$  Па. Выбираем поршневой компрессор HaileaElectricalMagnetic AC ACO-009D.

**В третьей главе** приведены методика, результаты и их анализ.

На основании схемы технологического процесса (рисунок 1) разработана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Структурная схема экспериментальной установки

Установка включает: блок управления, генератор сигналов (формирует импульсы 500 Гц, длительностью 57,6 мкс), усилитель мощности, высоковольтный трансформатор (10 кВ), разрядный блок пластинчатого типа, компрессор, герметичный корпус электроозонатора, гибкие трубопроводы и диффузоры из пористого камня для барботажу суспензии.

Особое внимание, в процессе общей экспериментальной работы уделялось нагреву озон-воздушной смеси в герметичном корпусе разрядного устройства электроозонатора, с этой целью был запланирован отдельный эксперимент. Эксперимент составили из двух частей, в первом случае разрядное устройство

запитали при синусоидальном «классическом» напряжении ( $U=10,0$  кВ,  $F=50$  Гц,) и второй эксперимент, где установили требуемые параметры на генераторе напряжения с частотой 500 Гц и длительностью импульсов 57,6 мкс., амплитудой импульсов 10 кВ. С помощью платиновой термопары ТОРЕ 361/362 Pt100 кл.В, установленной на выходном патрубке герметичного корпуса разрядного устройства проводили контроль и регулировку температуры озono-воздушной смеси. Результаты эксперимента представили на рисунке 6.

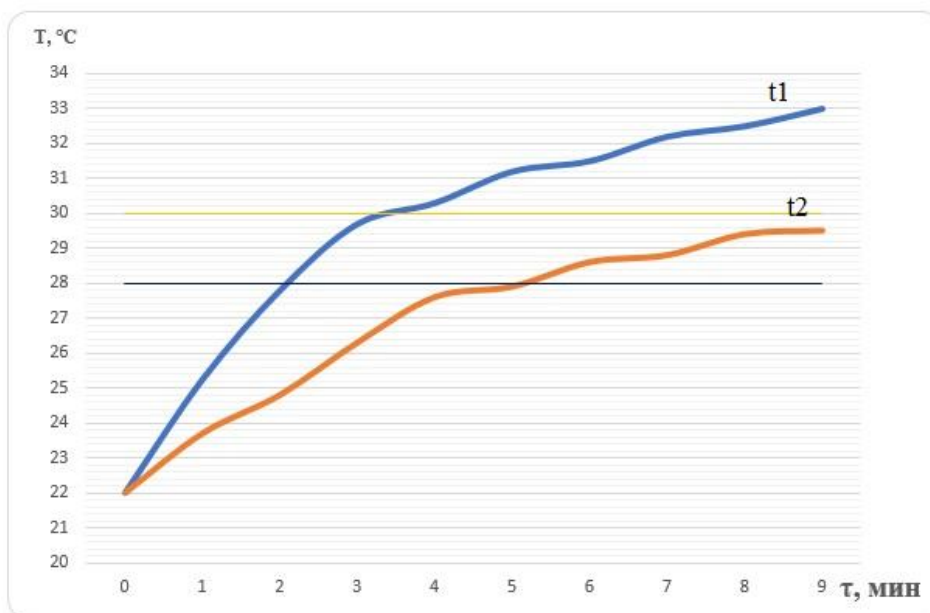


Рисунок. 6 – Нагрев озono-воздушной смеси на выходе из герметичного разрядного устройства. Где t1 - нагрев при питании синусоидальным сигналом; t2 - нагрев при импульсном питании

Таким образом, полученные данные указывают, что при работе герметичного разрядного устройства на синусоидальном «классическом» напряжении нагрев озono-воздушной смеси с начальной температурой 22 °C до 30 °C будет происходить за 3-4 минуты (при расходе воздуха 100 л/мин), при этом устройство, работающее на импульсном напряжении, нагревалось значительно медленнее и вышло в установившийся режим при 29 °C, что допустимо для данного процесса. Следовательно, устройство, работающее на синусоидальном токе можно использовать в технологических процессах где время барботации может быть менее 4-х минут. В случае если необходимо более продолжительное воздействие, то требуется использование предложенного способа снижения нагрева.

Концентрацию озона измеряли йодометрическим методом, как наиболее точным для диапазона 4% – 10<sup>-6</sup>%. Сущность метода заключается в пропускании озono-воздушной смеси через раствор йодистого калия, где озон окисляет иодид-ионы до свободного йода, который затем титруется тиосульфатом натрия. Расчет концентрации проводили по формуле.

$$[O_3]_{(об\%)} = 100 \cdot \frac{22,41 \cdot p_0 \cdot \nu \cdot T \cdot N}{2 \cdot p \cdot T_0 \cdot 1000 \cdot V} \cong 1,12 \frac{\nu \cdot N}{\omega \cdot \tau}, \quad (17)$$

где  $p_0$  и  $T_0$  – нормальные давление и температура;  $p$  и  $T$  – давление и температура, при которых производятся измерения;  $\nu$  – количество миллилитров тиосульфата, израсходованного на титрование;  $N$  – нормальность раствора тиосульфата;  $V = \omega \tau$  – объём озоноздушной смеси (в литрах), пропущенной через раствор;  $\omega$  – объёмная скорость потока газа;  $\tau$  – время прокачки.

Концентрацию клеток хлореллы определяли подсчетом в двухсеточной камере Горяева с использованием электронного микроскопа. Методика включала отбор пробы, нанесение на камеру, подсчет клеток в пяти больших квадратах и расчет по формуле (18). Оптическую плотность суспензии измеряли на фотоэлектроколориметре КФК-2.

$$C_{хл} = \frac{1}{0,004 \cdot 10^{-3}} \cdot N_{ккл} = N_{ккл} \cdot 2,5 \cdot 10^5, \quad (18)$$

где  $C_{хл}$  – концентрация клеток в неразбавленной суспензии хлореллы, кл/мл;  $N_{ккл}$  – среднее арифметическое количество подсчитанных клеток под одним квадратом, шт.

Первоначально был проведен поисковый эксперимент для выявления области эффективных концентраций озона. Обработку проводили при фиксированном времени 10 мин с концентрациями 9,34; 17,79 и 40,04 мг/м<sup>3</sup>. Результаты показали, что при концентрации 9,34 мг/м<sup>3</sup> концентрация клеток составила 13,75 · 10 кл/мл (контроль 13,0 · 10), а при более высоких концентрациях наблюдалось снижение. Это указывало на наличие оптимума.

Результаты поискового эксперимента по нахождению эффективной концентрации озона представлены, в графическом виде на рис.7.

Для получения статистически достоверных результатов и оценки влияния всех факторов был спланирован и проведен полнофакторный эксперимент типа 4×4×4. Уровни варьирования факторов выбраны на основе поисковых опытов:

- $x_1$  – время обработки  $\tau$ : 4, 6, 8, 10 мин;
- $x_2$  – концентрация озона  $[C_{O_3}]$ : 3,0; 5,0; 7,0; 9,0 мг/м<sup>3</sup>;
- $x_3$  – количество обработок в течение четырех дней  $M$ : 1, 2, 3, 4.

Зависимые переменные, согласно ТУ9291-003-12001826-05 для штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111:

- $y_1$  – концентрация клеток хлореллы  $C_{хл}$ , млн кл/мл;
- $y_2$  – оптическая плотность суспензии  $D_{хл}$ .

Обработка результатов выполнена в программе STATISTICA 6.0 с использованием методов множественного регрессионного анализа.

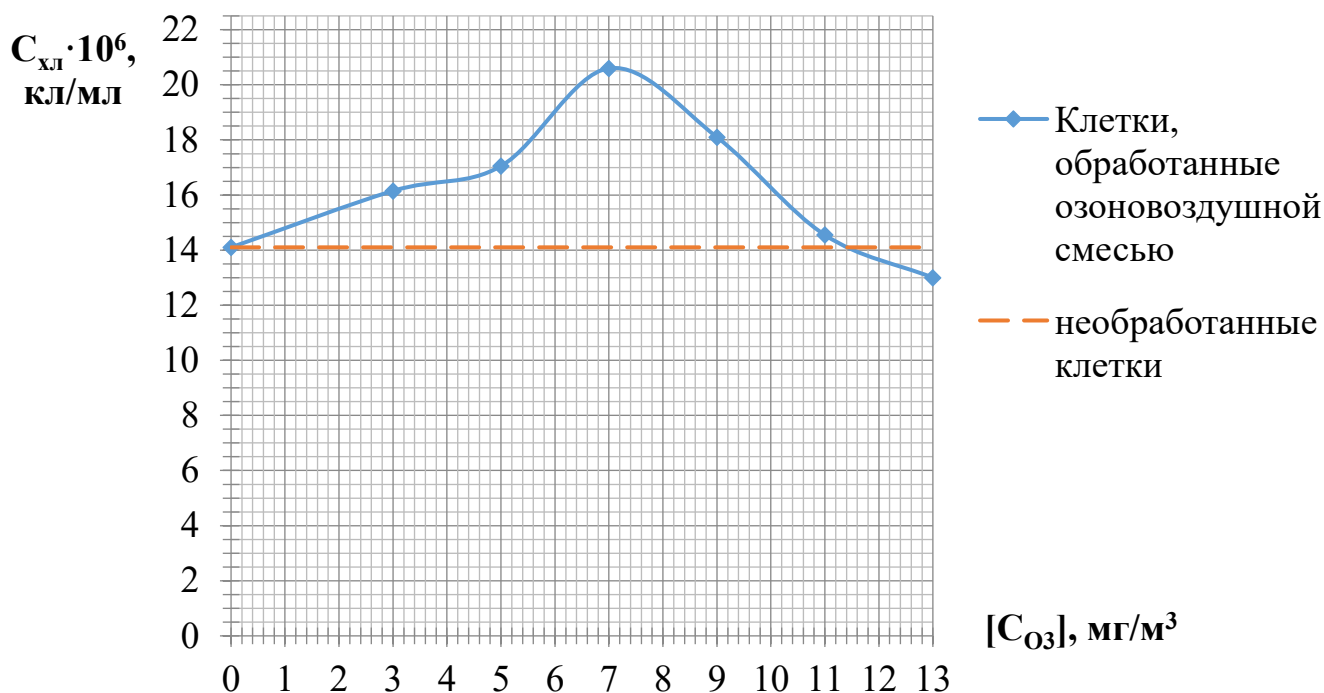


Рисунок 7 – Данные поискового эксперимента по нахождению эффективной концентрации озона

Получены следующие уравнения регрессии в кодированных переменных:  
 Для концентрации клеток ( $R = 0,91$ ;  $R^2 = 0,87$ ;  $F(3,64)=6,23$ ;  $p<0,00089$ ):

$$C_{xл} = 17,44 + 0,51C_{O_3} - 0,13M + 0,29\tau C_{O_3} - 0,49\tau M + 0,29C_{O_3}M + 0,57C_{O_3}^2 - 0,24M^2 + 0,49C_{O_3}^3 - 0,22M^3 \quad (19)$$

Для оптической плотности ( $R = 0,92$ ;  $R^2 = 0,86$ ;  $F(3,64)=6,42$ ;  $p<0,00072$ ):

$$D_{xл} = 1,05 + 0,48C_{O_3} - 0,22M + 0,37\tau C_{O_3} - 0,54\tau M + 0,29C_{O_3}M + 0,45C_{O_3}^2 - 0,25M^2 + 0,45C_{O_3}^3 - 0,2M^3 \quad (20)$$

Анализ коэффициентов регрессии показал, что наибольшее положительное влияние на обе зависимые переменные оказывает фактор концентрации озона, а также взаимодействие «концентрация × время» и «концентрация × периодичность». Отрицательное влияние фактора времени и его взаимодействий при больших значениях свидетельствует о наличии оптимума.

Для наглядности построены поверхности отклика. На Рисунке 8 представлена зависимость концентрации клеток от времени обработки и концентрации озона (при фиксированной периодичности  $M=2$ ). Четко видна область максимума в районе  $\tau = 6$  мин и  $C_{O_3} = 7,0$  мг/м<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение параметров приводит к снижению концентрации, вероятно, из-за окислительного стресса и повреждения клеток.

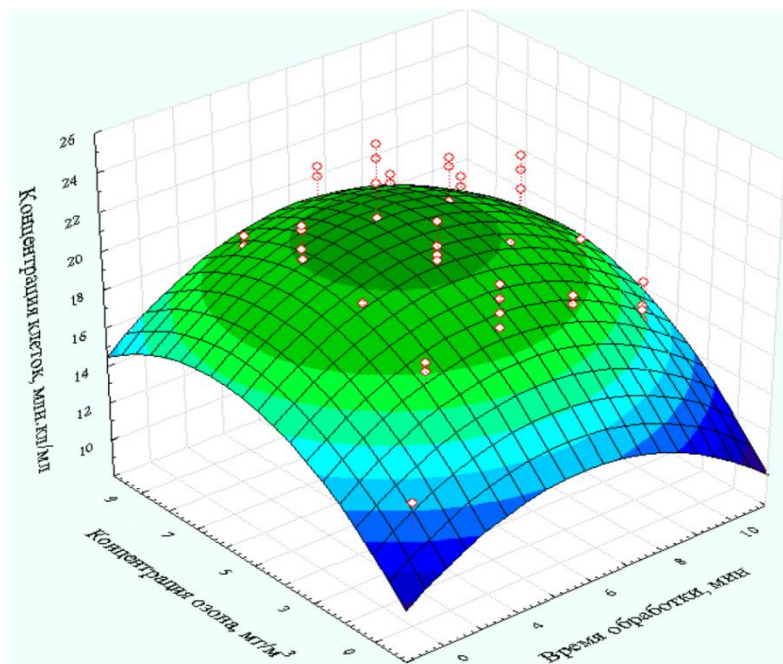


Рисунок 8 - Диаграмма влияния времени обработки и концентрации озона на концентрацию клеток хлореллы в суспензии  $y_1$

На Рисунке 9 показана зависимость концентрации клеток от концентрации озона и количества обработок (при  $\tau = 6$  мин). Максимум достигается при  $M = 2$  обработки в четыре дня. Увеличение числа обработок до 3-4 снижает эффект, что может быть связано с кумулятивным действием озона.

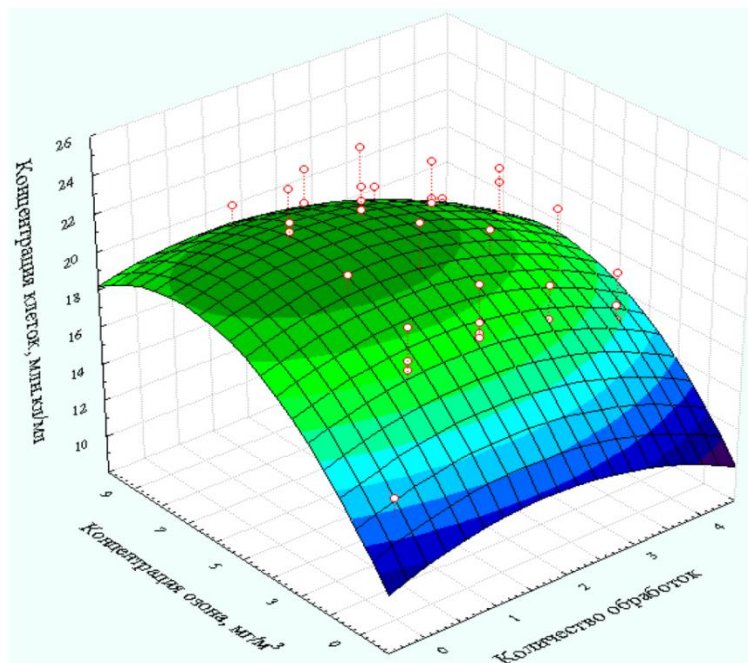


Рисунок 9 – Диаграмма зависимости концентрации клеток хлореллы в суспензии  $S_{chl}$  от концентрации озона и количества обработок за четыре дня

Аналогичные поверхности построены для оптической плотности, подтверждающие те же оптимальные сочетания факторов.

Таким образом, экспериментально установлены оптимальные параметры электроозонной обработки суспензии хлореллы:

- концентрация озона – 7,0 мг/м<sup>3</sup>;
- время обработки – 6 минут;
- количество обработок – 2 раза в четыре дня.

При этих параметрах достигается максимальная концентрация клеток – 24,47·10<sup>6</sup> кл/мл, что в 1,7 раза выше контроля (14,1·10<sup>6</sup> кл/мл). Оптическая плотность при этом составляет 1,45 против 0,85 в контроле. Сводные данные по всем уровням концентрации представлены в Таблице 5.

Таблица 5 – Влияние озонвоздушной обработки на рост клеток хлореллы

| Показатель<br>роста хлореллы      | Концентрация озона, мг/м <sup>3</sup> |                       |                       |                       | Контроль             |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
|                                   | 3,0                                   | 5,0                   | 7,0                   | 9,0                   |                      |
| Концентрация клеток,<br>кл/мл     | 20,45·10 <sup>6</sup>                 | 22,23·10 <sup>6</sup> | 24,47·10 <sup>6</sup> | 21,74·10 <sup>6</sup> | 14,1·10 <sup>6</sup> |
| Оптическая плотность<br>суспензии | 1,21                                  | 1,32                  | 1,45                  | 1,30                  | 0,85                 |

**В четвертой главе** выполнено технико-экономическое обоснование применения электроозонной технологии. Сравнивались два варианта производства суспензии хлореллы (40 т/мес): базовый (инвестиции 1,5 млн руб.) и с использованием озонатора (инвестиции 1,57 млн руб.). Внедрение озонатора позволяет увеличить выход продукции на 71% (до 68,4 т/мес). Основные показатели эффективности инновационного проекта за 3 года (ставка дисконтирования 20%): чистый дисконтированный доход – 34,3 млн руб., индекс прибыльности – 50,2 руб./руб., срок окупаемости – 16,5 дня. Точка безубыточности составляет 3,44 т/мес, что обеспечивает двадцатикратный запас финансовой прочности. Проект рекомендуется к внедрению в сельскохозяйственных предприятиях Краснодарского края.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ существующих методов и технических средств стимуляции ростовых процессов микроводоросли, а также определены требования режимных параметров для условий работы в изолированной системе (максимальный нагрев озонвоздушной среды до 30°С и электроозонирующее устройство достаточной производительности для данного технологического процесса). Так для технологического процесса выращивания хлореллы, необходимо электроозонирующее устройство производительностью 15 гр./час и

допустимой температурой нагрева воздушной среды (до 30°C), при условии работы в изолированной системе.

2. Получена, математическая модель, описывающая процессы, происходящие в газоразрядной ячейке озонатора при условии работы в изолированной системе, позволяющая определить необходимую электрическую мощность разрядного устройства (для заданной производительности электроозонатора и температуры озоновоздушной смеси) и характеристики питания электроозонатора. В частности, с использованием полученной математической модели разрядного блока электроозонатора разработан электроозонатор производительностью 15 г/ч., мощностью 300 Вт, где при условии нагрева озоновоздушной смеси не более 28-30°C к электродам необходимо подводить импульсное напряжение 10кВ, при частоте следования импульсов 500 Гц, длительность импульса 57,6 мкс.

3. Экспериментально установлены оптимальные параметры электроозонной технологии стимулирования клеток микроводоросли хлореллы, которые составили:

- 1) концентрация озона - 7,0 мг/м<sup>3</sup>;
- 2) время обработки – 6 минут;
- 3) количество обработок – 2 раза за технологический процесс

выращивания хлореллы, составляющий четыре дня.

Максимальное увеличение прироста концентрации клеток микроводоросли хлореллы и оптической плотности, составило соответственно 73,50% и 70,6%.

4. Получены регрессионные модели влияния параметров электроозонирования на концентрацию клеток хлореллы и оптическую плотность раствора суспензии. Проведённый регрессионный анализ экспериментальных данных, показал, что исследуемые параметры (концентрация, время обработки, количество обработок) в 85% случаев влияют на увеличение концентрации клеток хлореллы и в 87% случаев влияют на увеличение оптической плотности раствора суспензии хлореллы.

5. Экономическая эффективность при использовании электроозонной технологии стимулирования хлореллы, выраженная через чистый дисконтированный доход, за три года составляет 34300 тыс. руб.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования и рекомендации:**

Дальнейшие исследования планируется направить на изучение влияния электроозонной обработки на другие штаммы микроводорослей и гидробионтов (например, дафнии, используемые в рыбоводстве), а также на разработку систем автоматического управления процессом озонирования, позволяющих

поддерживать оптимальные параметры в реальном времени в зависимости от физиологического состояния культуры. Перспективным является также исследование комбинированного воздействия озона и электромагнитных полей.

### **Основные положения диссертации опубликованы**

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Оптимизация параметров электроозонной установки / В. Л. Болотин, Д. А. Нормов, Е. А. Федоренко, А. А. Азарян // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 44-45 (авт. 0,2 п.л.).
2. Влияние электроозонирования на зараженность зерна грибковыми заболеваниями / В. Л. Болотин, Д. А. Нормов, Е. А. Федоренко, С. В. Соловьев, М. Ndiaye // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2025. – № 2 (46). – С. 13-20 (авт. 0,7 п.л.).
3. Болотин, В. Л. Использование электроозонирования для дезинфекции биореакторов / В. Л. Болотин, Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев // Международный технический журнал. – 2026. – № 1(101). – С. 116-123 (авт. 0,5 п.л.).

*Патенты РФ на изобретение:*

4. Патент № 2779080 С1 Российская Федерация, МПК С12G 1/02. Способ осветления виноградного сусла : № 2021119264 : заявл. 30.06.2021 : опубл. 31.08.2022 / Д. А. Нормов, Д. А. Бибко, С. П. Игнатченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

*Научные статьи, материалы конференций*

5. Болотин, В. Л. Технологический процесс электроозонной обработки хлореллы / В. Л. Болотин, Д. А. Нормов, Е. А. Федоренко [Электронный ресурс] // Научно-практический журнал «Нефть и газ: опыт и инновации». – 2026. – Т. 10, № 2. – Режим доступа: <https://nigaz.ru/wp-content/uploads/2026/04/%D0%A2%D0%95%D0%A5%D0%9D%D0%9E%D0%9B%D0%9E%D0%93%D0%98%D0%A7%D0%95%D0%A1%D0%9A%D0%98%D0%99-%D0%9F%D0%A0%D0%9E%D0%A6%D0%95%D0%A1%D0%A1-%D0%AD%D0%9B%D0%95%D0%9A%D0%A2%D0%A0%D0%9E%D0%9E%D0%97%D0%9E%D0%9D%D0%9D%D0%9E%D0%99-%D0%9E%D0%91%D0%A0%D0%90%D0%91%D0%9E%D0%A2%D0%9A%D0%98-%D0%A5%D0%9B%D0%9E%D0%A0%D0%95%D0%9B%D0%9B%D0%AB.pdf>.

6. Болотин, В. Л. Определение мощности разряда герметичного электроозонатора [Электронный ресурс] / В. Л. Болотин, Д. А. Нормов, Е. А. Федоренко // Научно-практический журнал «Нефть и газ: опыт и инновации». – 2026. – Т. 10, № 2. – Режим доступа: <https://nigaz.ru/wp-content/uploads/2026/04/%D0%9E%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%94%D0%95%D0%9B%D0%95%D0%9D%D0%98%D0%95-%D0%9C%D0%9E%D0%A9%D0%9D%D0%9E%D0%A1%D0%A2%D0%98-%D0%A0%D0%90%D0%97%D0%A0%D0%AF%D0%94%D0%90-%D0%93%D0%95%D0%A0%D0%9C%D0%95%D0%A2%D0%98%D0%A7%D0%9D%D0%9E%D0%93%D0%9E-%D0%AD%D0%9B%D0%95%D0%9A%D0%A2%D0%A0%D0%9E%D0%9E%D0%97%D0%9E%D0%9D%D0%90%D0%A2%D0%9E%D0%A0%D0%90-.pdf>.

7. Болотин, В. Л. Электроозонная стимуляция роста микроводоросли // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 28-29 января 2026 года. Часть 3. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2026. – С. 205-210.