

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Болотина Владимира Леонидовича на тему «Обоснование параметров работы электроозонаторов для повышения производительности установки выращивания микроводоросли», представленную к защите в диссертационный совет 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

1. Актуальность темы исследования

В условиях геополитической нестабильности, санкционного давления и колебаний мировых рынков критически важно наращивать внутренний потенциал агропромышленного комплекса страны и обеспечивать её продовольственную безопасность – стратегический приоритет. Согласно Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации социально-экономическая стабильность государства и благополучие населения зависит от продовольственной независимости страны, а также физической и экономической доступности качественных продуктов питания в объёмах, соответствующих рациональным нормам потребления.

Современный этап развития агропромышленного комплекса характеризуется повышенным интересом к инновационным кормовым добавкам, среди которых особое место занимает микроводоросль хлорелла. Она является ценным компонентом рациона сельскохозяйственных животных благодаря содержанию в биомассе как макро-, так и микронутриентов.

Стоит отметить, что традиционные методы культивирования хлореллы имеют ряд существенных ограничений, а именно: высокие энергозатраты; низкая производительность биореакторов; риск загрязнения культуры; проблемы терморегуляции и др.

Одним из перспективных направлений повышения производительности установок по выращиванию микроводорослей является применение электрофизического способа – электроозонирования. Озон является мощным окислителем, который при оптимальных дозах может оказывать стимулирующее (увеличение прироста биомассы микроводоросли за счёт активации метаболических процессов) и бактерицидное действие (уничтожение патогенных микроорганизмы в питательной среде увеличивает чистоту культуры), является экологически безопасным (отсутствие вредных остатков в биомассе), а также улучшает массообмен (обеспечение дополнительного перемешивания суспензии и насыщения её кислородом).

Несмотря на перспективность использования электроозонирования при культивировании микроводоросли хлореллы, его широкое применение ограничивается недостаточной проработкой ряда ключевых вопросов, среди которых выделяют отсутствие:

- научно обоснованных параметров работы электроозонаторных устройств (концентрация озона, продолжительность воздействия, частота обработок и др.), обеспечивающих максимальный прирост биомассы без повреждения клеток микроорганизма;
- математических моделей, описывающих влияние параметров озонирования на рост микроводорослей.

Таким образом, исследование параметров работы электроозонаторных устройств для повышения производительности установок выращивания микроводорослей является важной научно-технической задачей, решение которой позволит: повысить эффективность культивирования; снизить энергозатраты на производство биомассы; обеспечить высокое качество кормовой добавки; использовать экологически безопасные технологии в сельском хозяйстве.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что диссертационная работа Болотина В.Л. на тему «Обоснование параметров работы электроозонаторов для повышения производительности установки

выращивания микроводоросли» является актуальной и обладает существенной научной и практической ценностью.

2. Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

– разработана математическая модель тепловых электрических процессов электроразрядного блока озонатора для условий работы в изолированной системе;

– установлены эффективные параметры обработки при электроозонировании, позволяющие увеличить концентрацию и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы;

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

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе

Обоснованность и достоверность изложенных в диссертационной работе научных положений, рекомендаций и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также использованием достоверных литературных источников.

4. Значимость полученных результатов

Теоретическую и практическую значимость диссертационной работы, посвященной обоснованию параметров работы электроозонаторов для повышения производительности установки выращивания микроводоросли, составляют результаты:

- математического моделирования тепловых электрических процессов при работе электроразрядного блока озонатора;
- 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.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в технологический процесс культивирования микроводоросли хлореллы на предприятии ИП «А.В. Трифонов».

5. Структура, объем и степень завершенности диссертации

Диссертация Болотина Владимира Леонидовича является завершенной научной работой, направленной на решение актуальной проблемы. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Содержит 14 таблиц, 39 рисунков и 150 литературных источников, из которых 3 – на иностранном языке.

Во введении представлены актуальность темы, степень разработанности темы исследования, цель работы, решаемые задачи, научная новизна, практическая значимость работы, определены объект, предмет и методы исследования, а также основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о реализации результатов исследований, апробации, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первом разделе диссертационной работы проведён комплексный анализ современных методов повышения продуктивности выращивания микроводоросли хлореллы и рассмотрены электрофизические технологии, потенциально применяемые в сельском хозяйстве.

Выполнено теоретическое исследование ключевых факторов, влияющих на рост и урожайность хлореллы: температура, интенсивное перемешивание среды,

химические катализаторы, искусственное освещение, площадь высева. Рассмотрены электрофизические методы стимуляции сельскохозяйственных культур и микроорганизмов: электромагнитные поля, озонирование и др. Систематизированы современные подходы к культивированию микроводорослей, включая использование биореакторов, оптимизацию питательной среды и контроль параметров среды. Подтверждена перспективность электрофизических методов (в т.ч. озонирования) для повышения урожайности, отмечена необходимость уточнения параметров их применения.

В заключительной части раздела представлен обзор современных установок для получения озона и их технические характеристики. На основе анализа существующих методов и технологий выявлены наиболее перспективные направления повышения продуктивности выращивания хлореллы. Обоснована актуальность исследования параметров работы электроозонаторов как способа решения проблем низкой производительности и энергоёмкости традиционных установок. Сформулированы предварительные задачи дальнейшего исследования, направленные на оптимизацию процесса культивирования с применением озонирования.

Второй раздел посвящен теоретическим основам электроозонирования суспензии хлореллы. В рамках раздела проведены комплексные теоретические и практические исследования, направленные на разработку и обоснование технологии электроозонной обработки суспензии хлореллы. Прежде всего, создана структурно-функциональная схема технологического процесса обработки суспензии хлореллы озоном. Схема наглядно демонстрирует взаимосвязь компонентов системы и включает: блок генерации озона (электроозонатор), систему дозирования и распределения озона в биореакторе, этапы подготовки и подачи озоновоздушной смеси, контур контроля параметров (концентрация озона, температура, время воздействия), а также механизмы обратной связи для поддержания оптимальных условий обработки. Разработанная схема служит основой для практической реализации технологии.

Разработана математическая модель, описывающая физические процессы в газоразрядной ячейке электроозонатора при работе в изолированной системе. Модель даёт возможность рассчитывать необходимую электрическую мощность разрядного устройства для заданной производительности озонатора, определять характеристики питающего сигнала и прогнозировать температуру озоновооздушной смеси, предотвращая перегрев последней. Для условий нагрева озоно-воздушной смеси не более 28-30 °С и производительности электроозонатора 15 г/ч модель позволила установить следующие параметры питающего сигнала: импульсное напряжение – 10 кВ; частота следования импульсов – 500 Гц; длительность импульса – 57,6 мкс. Эти данные обеспечивают научно обоснованный выбор режимов работы оборудования и способствуют минимизации энергозатрат.

Кроме того, выполнен аэродинамический расчёт системы подачи озоновооздушной смеси в ёмкость с суспензией хлореллы. В ходе расчёта определены: потребный напор компрессора (с учётом сопротивления трубопроводов, диффузоров и слоя суспензии), расход озоновооздушной смеси для равномерного распределения озона по объёму биореактора, а также потери давления в системе и оптимальные диаметры трубопроводов. На основе полученных результатов осуществлён выбор компрессионного устройства, которое соответствует требованиям по производительности, напору, энергоэффективности и совместимости с агрессивной средой (озон, влажность).

В ходе теоретических исследований выявлены ограничения существующих моделей. Установлено, что они не позволяют в полной мере оценить влияние озона на ключевые показатели культивирования хлореллы, в т.ч.: динамику роста биомассы; изменение биохимического состава; жизнеспособность клеток при различных концентрациях озона; устойчивость культуры к вторичному загрязнению. В связи с этим была выявлена необходимость в проведении практического эксперимента: верифицирование математической модели на реальных данных, уточнение эффективных

параметров озонирования и оценка эффективности технологии в сравнении с традиционными методами культивирования.

В третьем разделе приведены методики и результаты экспериментальных исследований влияния электроозонирования на клетки микроводоросли хлореллы.

Построены уравнения регрессии, позволяющие количественно оценить степень влияния каждого исследуемого фактора на процесс стимулирования роста микроводорослей. Полученные математические модели способствуют прогнозированию результатов обработки при различных сочетаниях параметров; выделению наиболее значимых факторов, влияющих на рост биомассы; оптимизации режимов обработки для достижения максимальной производительности.

Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных. Результаты показали, что исследуемые параметры (концентрация озона, экспозиция и кратность обработок) в 87 % случаев влияют на увеличение концентрации клеток хлореллы, а в 86 % случаев – на рост оптической плотности раствора суспензии хлореллы, что косвенно отражает прирост биомассы.

Полученные коэффициенты детерминации подтверждают статистическую значимость моделей и их пригодность для практического применения при проектировании технологических процессов.

На заключительном этапе проведены экспериментальные исследования с целью верификации математических моделей и поиска оптимальных режимов обработки. В ходе опытов варьировались следующие технологические параметры: концентрация озono-воздушной смеси, продолжительность одной обработки и их периодичность в течение цикла культивирования.

По итогам серии экспериментов определены эффективные режимы обработки суспензии хлореллы *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111, позволяющие в два раза увеличить производительность культиватора: концентрация озона – 7,0 мг/м³; время обработки – 6 мин.; количество обработок – 2 раза/ 4 сут.

Полученные результаты экспериментальных исследований имеют практическую ценность для проектирования установок по выращиванию хлореллы с применением электрофизической стимуляции (озонирования) и могут быть внедрены в агропромышленный комплекс для повышения развития производства и эффективности использования кормовых добавок для сельскохозяйственных животных.

В четвертом разделе представлен расчет показателей технико-экономической эффективности применения электроозонаторов с обоснованными параметрами работы в установках по выращиванию микроводоросли.

В заключении представлены пять основных выводов и перспективы дальнейшей разработки темы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научно-методическом уровне, представляет собой законченный труд, материал последовательно изложен и, несомненно, имеет научно-практическую значимость.

Оформление диссертации соответствует нормативным положениям, предъявляемым к научным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата технических наук. В работе выполнены исследования в соответствии с паспортом специальностей ВАК Министерства науки и высшего образования РФ по научной специальности 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки):

– п.1. Электрофизические свойства сельскохозяйственных биологических объектов, продуктов и материалов как объектов электротехнологий. Электрические, электромагнитные и магнитные воздействия на свойства продуктов, материалов и биологических объектов в технологических процессах АПК;

– п.2. Электротехнологии, освещение и облучение в технологических процессах АПК;

– п.7. Технические средства, электротехнологии, алгоритмы и прикладное программное обеспечение, автоматизированные системы для диагностики и повышения надёжности эксплуатации электрооборудования в технологических процессах АПК.

6. Полнота опубликования основных результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, из них: 3 входят в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 патент РФ на изобретение. Опубликованные научные работы в полной мере соответствуют основным положениям диссертации.

7. Соответствие содержания автореферата диссертации

Автореферат раскрывает основное содержание диссертации в полной мере, отражает её научные положения и выводы. Он содержит решение поставленных задач по обоснованию параметров работы электроозонаторов для повышения производительности установки выращивания микроводоросли.

8. Замечания по диссертации

По содержанию диссертационной работы имеются следующие вопросы и замечания:

1. В диссертационной работе при описании математической модели теплообмена в разрядной камере были рассмотрены только два фактора – скорость газа и мощность разряда. Помимо этих факторов учитывались другие воздействия?

2. Каким образом обоснован выбор граничных условий для дифференциальных уравнений теплового баланса? При моделировании учитывался эффект неравномерного распределения температуры по сечению разрядного промежутка?

3. Осуществлялся ли контроль за поддержанием чистоты культуры микроводоросли *Chlorella* в ходе экспериментальных исследований? Если да, то какие методы использовали?

4. При экспериментальных исследованиях соискателем был использован йодометрический метод определения концентрации озона. Рассматривались ли другие методы?

5. В какой степени суточные температурные колебания могли повлиять на воспроизводимость экспериментальных результатов? Какие меры были предприняты для оценки и минимизации погрешности, обусловленной температурными вариациями в течение суток?

6. Обоснуйте выбор частоты 500 Гц для импульсного питания в рамках проведённого эксперимента. Каким образом определяли оптимальную длительность импульсов в 57,6 мкс?

7. Оцените потенциальный риск накопления озона в рабочей зоне оператора при реализации предложенной технологии культивирования микроводоросли хлореллы.

8. Как обеспечивается равномерность распределения озона в суспензии хлореллы? Предусмотрен ли контроль за концентрацией озона в реальном времени?

9. В работе следовало бы указать комплекс мер, обеспечивающих электробезопасность персонала при эксплуатации оборудования, работающего под высоким напряжением, с указанием нормативной документации, которым соответствуют принятые технические решения в установке выращивания микроводоросли.

10. Опишите комплекс технических решений, обеспечивающих стабильность работы установки при колебаниях напряжения питания.

11. Какие меры предусмотрены для предотвращения перегрева оборудования и электродов электроозонатора?

12. Изучалось ли дополнительно воздействие электромагнитного излучения, сопутствующего процессу генерации озона, на процесс культивирования микроводоросли?

13. Проводился ли сравнительный анализ различных типов электроозонаторных устройств при выборе оптимального технического решения, или выбор изначально был ограничен применением озонаторов барьерного типа разряда?

14. В диссертационной работе отсутствует развёрнутое описание механизма регулирования концентрации озона. В связи с этим возникает ряд уточняющих вопросов:

- Каков принцип регулирования концентрации озона на выходе из электроозонатора? Осуществляется вручную или в автоматическом режиме?

- Каков характер регулирования: плавный (непрерывный) или ступенчатый (дискретный)?

15. Проводились ли дополнительные исследования количественной оценки зависимости содержания нутриентов в биомассе хлореллы от применяемых режимов её обработки?

16. Каким образом осуществлялось моделирование затрат на потребление электроэнергии в рамках расчёта показателей экономической эффективности?

Отмеченные в отзыве замечания имеют частный характер и не снижают ценности выполненной работы и общего благоприятного впечатления.

9. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Болотина Владимира Леонидовича на тему «Обоснование параметров работы электроозонаторов для повышения производительности установки выращивания микроводоросли» является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научно-методическом уровне, в которой изложены научно обоснованные технические и

технологические разработки, направленные на повышение производительности установки выращивания микроводоросли хлореллы. Отмеченные актуальность, новизна, объем исследований и их грамотная интерпретация позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа полностью соответствует п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г.), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Болотин Владимир Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидат технических наук по специальности 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки).

Официальный оппонент:

кандидат технических наук

(специальность 4.3.2 – Электротехнологии,

электрооборудование и энергоснабжение

агропромышленного комплекса, 2024 г.),

старший преподаватель

инженерного факультета

ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ  Мануйленко Александр Николаевич

18.05.2026 г.



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина» (ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ)

Россия, 308503, Белгородская обл., м.о. Белгородский, п. Майский, ул. Вавилова, д.1
Тел.: +7 (4722) 39-22-62; E-mail: info@belgau.ru