

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

*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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Нормов Д.А.

Москва – 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 5  |
| 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....  | 11 |
| 1.1 Современные методы ускорения роста клеток<br>и увеличение продуктивности при выращивании хлореллы.....                | 11 |
| 1.1.1 Влияние температуры на урожайность<br>микроводоросли хлореллы.....  | 13 |
| 1.1.2 Использование интенсивного перемешивания среды<br>при культивировании хлореллы.....                                 | 15 |
| 1.1.3 Применение химических веществ<br>в качестве катализаторов роста клеток хлореллы.....                                | 18 |
| 1.1.4 Роль искусственного освещения в повышении<br>Урожайности микроводоросли хлореллы.....                               | 22 |
| 1.1.5 Влияние площади высева на урожайность хлореллы.....   | 23 |
| 1.2 Электрофизические эффекты в сельском хозяйстве как факторы<br>повышения урожайности сельскохозяйственных культур..... | 24 |
| 1.2.1 Стимуляция роста и развития микроорганизмов с<br>использованием электромагнитных<br>полей.....                      | 24 |
| 1.2.2 Стимуляция ростовых процессов растений и повышение<br>посевных качеств семян с помощью озона.....                   | 27 |
| 1.2.3 Биотехнология выращивания суспензии<br>хлореллы.....  | 33 |
| 1.3 Современные установки для получения озона и их<br>технические характеристики.....                                     | 36 |
| 1.4 Выводы и задачи<br>исследования.....  | 40 |
| 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРО-<br>ОЗОНИРОВАНИЮ СУСПЕНЗИИ ХЛОРЕЛЛЫ.....   | 42 |
| 2.1 Технологический процесс электроозонной  |    |

|   |            |
|---|------------|
| обработки хлореллы.....   | 42         |
| 2.2 Термодинамический расчет электроразрядной ячейки электроозонатора.....  | 46         |
| 2.3 Анализ изменения концентрации озона в газоразрядном промежутке.....   | 52         |
| 2.4 Мощность разряда.....   | 57         |
| 2.5 Аэродинамический расчёт системы подачи озонозооной смеси в ёмкости с суспензией хлореллы с учётом местных пневматических сопротивлений..... | 59         |
| 2.6 Выводы .....  | 67         |
| <b>3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЯ НА КЛЕТКИ МИКРОВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛЫ.....</b>                                      | <b>69</b>  |
| 3.1 Методика экспериментальных исследований.....  | 69         |
| 3.1.1 Описание экспериментального оборудования.....   | 69         |
| 3.1.2 Методика измерения концентрации озона.....  | 74         |
| 3.1.3 Методика проведения лабораторных исследований.....  | 76         |
| 3.1.4 Исследование влияния озона на рост и развитие клеток хлореллы.....  | 78         |
| 3.2 Исследование влияния параметров электроозонирования и количества обработок на концентрацию клеток микроводоросли хлореллы.....              | 88         |
| 3.3 Исследование влияния параметров электроозонирования и количества обработок на оптическую плотность суспензии микроводоросли хлореллы.....   | 96         |
| 3.4 Выводы по главе.....  | 105        |
| <b>4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРООЗООННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СТИМУЛИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛЫ.....</b>                    | <b>106</b> |
| 4.1 Основные этапы технико-экономического   |            |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| обоснования.....                      | 106 |
| 4.3 Выводы по главе.....              | 113 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....                     | 114 |
| Список использованных источников..... | 116 |

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сельском хозяйстве России основные финансовые затраты приходится на корма (до 40-80%). Эффективная кормовая база играет основную роль в увеличении производства и повышения качества животноводческой и птицеводческой продукции. Только при полном обеспечении скота и птицы высококачественными кормами и кормовыми добавками можно получить большое количество молока, мяса, шерсти, яиц и т.д.

Успешное развитие этой отрасли сельскохозяйственного производства не представляется возможным без наличия сбалансированных кормов. За последние десятилетия разработаны кормовые добавки в виде премиксов, витаминов, аминокислот, биологически активных добавок. Работы в этом направлении продолжаются, так как все эти нововведения способствуют увеличению привесов, повышению продуктивности и сохранности поголовья. В последнее время все чаще встает проблема необходимости внедрения ресурсосберегающих технологий содержания и кормления животных. Одной из таких технологий является использование в качестве витаминно-кормовой добавки и профилактического средства против болезней в рационе сельскохозяйственных животных биомассы микроскопических водорослей.

К ним относится хлорелла – микроскопическое растение, которое является представителем одноклеточных зеленых водорослей и содержащее в своем составе большое количество белка, полного набора незаменимых аминокислот, углеводов, жиров, витаминов и биологических стимуляторов. В сельском хозяйстве хлорелла используется в виде суспензии, для приготовления которой используется штамм *Chlorella vulgaris* ИФР № С - 111. Количество суспензии на голову крупного рогатого скота (КРС) в дойном стаде необходимое для увеличения удоев до 25% составляет порядка 2 л/сут., для увеличения привесов на откорме КРС и свиней от 30% до 40%

потребуется от 3-х до 4 л/сутки. Добавление хлореллы в комбикорма в загущенном виде в количестве 30 – 50 мг/сутки на голову птицы, позволяет повысить яйценоскость до 15 % , увеличить массу яиц на 10-15% и снизить в разы падеж молодняка.[4, 27, 79, 115, 120, 129]Однако в сельском хозяйстве России на сегодняшний день использование суспензии хлореллы в качестве кормовой добавки крайне ограничено. Объясняется это недостаточными промышленными масштабами культивирования. Достаточно высокая энергоемкость производства заключается в том, что технологический процесс выращивания проходит под воздействием излучения светодиодов серии M23FS450D3 (для обеспечения эффекта фотосинтеза).Использование этих светодиодов объясняется их повышенными светотехническими характеристиками. При этом потребляемая энергия одной такой лампы составляет 0,3-0,45 кВт\*ч, таким образом, в сутки только одна лампа потребляет от 7,0 до 11,0 кВт\*ч электроэнергии. Светодиодная панельM23FS450D3 способна поддерживать оптимальный режим освещения для 8 – 10 емкостей, с объемом одной емкости 10литров. Таким образом, исходя из тарифа на электроэнергию в Краснодарском крае для юридических лиц и частных предприятий затраты на производство 80 – 100 литров суспензии хлореллы на электроэнергию составят 250-300 рублей, что сопоставимо 1/10 –ой частью реализуемой продукции, так как стоимость одного литра суспензии составляет 30 рублей.

Поэтому перед производителями хлореллы встает необходимость в повышении продуктивности при минимальных производственных затратах. Существующие технологии ускорения роста суспензии хлореллы путем повышения температуры, использования различных культивируемых сред, интенсивного перемешивания и подпитывания определенным количеством химических веществ не дают значительного эффекта или не являются экологически чистыми производствами. Таким образом, повышение производительности производства суспензии хлореллы при минимальных затратах, является актуальной сельскохозяйственной задачей.

Решением поставленной задачи, возможно, является применение электроозонирования для повышения урожайности суспензии хлореллы. Это в свою очередь вызывает необходимость определения оптимальных параметров электроозонной технологии и совершенствования существующих электроозонаторов.

### **Степень разработанности темы исследования.**

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., Иванова Ю.Г., Андреева С.А., Сторчевого В. Ф., Самарина Г.Н., Нормова Д.А., Оськина С.В., Суховского Н.С., 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 исследования**–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 работы**

1. Выполнить анализ существующих методов и технических средств стимуляции ростовых процессов микроводоросли, а также определить необходимые режимные параметры 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 озонозудушной 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 исследований.** 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.

**Научную новизну работы составляют:**

1. Математическая модель тепловых электрических процессов электроразрядного блока электроозонатора 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 озонозудушной 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.

**На защиту выносятся** следующие 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.

**Реализация результатов исследования.** Лабораторные исследования проводились в аккредитованной учебно-научной испытательной лаборатории РГАУ МСХА им.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).

**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 и 3 работы в прочих изданиях

**Объем и структура 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.

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Современные методы ускорения роста клеток и увеличение продуктивности при выращивании хлореллы

Проблема повышения продуктивности в процессе культивирования хлореллы представляет собой важную научно-практическую задачу, в связи с чем исследователи из разных стран мира направляют свои усилия на её решение. Поиск ведется в широком спектре направлений: начиная от селекции оптимального состава питательной среды и интенсификации процесса путем температурной стимуляции, заканчивая внесением специфических химических добавок, расширением площади инокуляции, а также внедрением методов принудительного перемешивания и организацией круглосуточного облучения культуральных емкостей.

В качестве примера можно привести исследования, проведенные на базе Узбекского научно-исследовательского института животноводства (УзНИИЖ). Сотрудниками института Р.А. Селяметовым и Х.Ф. Якубовым был изучен витаминный профиль различных штаммов и видов хлореллы, а также проанализированы методы повышения урожайности этой микроводоросли [8, 9, 108, 120, 121]. В ходе экспериментов культивирование осуществлялось в малогабаритных установках открытого типа, размещенных вне лабораторных помещений. Для выращивания использовались три варианта сред: стандартная среда 04, органо-минеральная смесь и полностью органическая среда. Органо-минеральный вариант готовился путем смешивания 0,5 литра минеральной основы (среда 04) с 0,5 литра водной вытяжки из куриного помета, при этом концентрация сухого помета составляла 3 грамма на литр готового раствора. Органическая среда представляла собой только водный раствор куриного помета в той же концентрации (3 г/л).

Дополнительно авторами отслеживалась динамика сохранности каротина в биомассе в процессе длительного хранения. Образцы высушенной муки из хлореллы анализировались на содержание пигментов через определенные интервалы времени. Было установлено, что за трехмесячный период хранения происходят значительные потери каротина: его остаточное количество составило лишь пятую часть от изначального уровня. Если в свежеприготовленной муке концентрация достигала 1824 мкг/г, то спустя 30 дней она упала до 851 мкг/г (что эквивалентно 46,7% от исходного значения). Еще через месяц (2 месяца хранения) фиксировалось снижение до 570 мкг/г (31,3%), а к концу третьего месяца содержание каротина опускалось до отметки 378 мкг/г, что соответствует 20,2% от первоначального объема. Эти данные указывают на необходимость использования стабилизирующих добавок или специальных условий упаковки (например, в атмосфере инертного газа или с применением вакууматоров) при производстве кормового продукта.

В рамках исследования также был проведен сравнительный анализ накопления витаминов разными штаммами. При выращивании на стандартной среде 04 были получены следующие результаты по содержанию витаминов в абсолютно сухом веществе. Для штамма *Chlorella vulgaris* 157 были характерны следующие показатели (в мкг/г): витамин А — 646; витамин Е — 140; витамин В1 — 4,6; В2 — 11,2; РР (ниацин) — 0; В6 — 4,8. В свою очередь, штамм *Chlorella pyrenoidosa* УА-1-1 продемонстрировал иную картину: витамин А был зафиксирован на уровне 1130 мкг/г; Е — 252 мкг/г; В1 — 5,0; В2 — 14,3; РР — 158; В6 — 5,3. Столь существенная разница в содержании ниацина (витамина РР) между штаммами (от 0 до 158 мкг/г) говорит о генетической предрасположенности конкретного штамма к синтезу этого соединения.

Для того чтобы установить степень влияния состава питательной среды на витаминную ценность биомассы, теми же учеными был проведен эксперимент с использованием штамма *Chlorella vulgaris* 157, который

выращивали на трех различных средах: базовой минеральной среде 04, среде 04 с добавлением экстракта помета и чистой вытяжке из помета [121]. Полученные данные демонстрируют вариативность биохимического состава в зависимости от условий питания. На минеральной среде 04 было зафиксировано: витамин А — 646 мкг/г; Е — 140; В1 — 4,6; В2 — 11,0; РР — 142; В6 — 4,8; холин — 3240. При переходе на среду 04 с экстрактом помета содержание витамина А осталось неизменным (646 мкг/г), однако уровень токоферола (Е) вырос до 164 мкг/г, а витамина В6 — до 5,6 мкг/г. При этом концентрация рибофлавина (В2) снизилась до 7,2 мкг/г, а ниацина (РР) — до 108 мкг/г. Наиболее бедной по каротиноидам оказалась чисто органическая среда (вытяжка из помета): витамина А в хлорелле накапливалось всего 580 мкг/г, В1 — 3,8, В2 — 9,6, РР — 136. Исключение составил витамин Е, содержание которого на органике достигло максимума в 168 мкг/г. Таким образом, штамм 157 демонстрирует максимальную продуктивность по каротину именно при использовании минеральной основы (среда 04) и ее комбинации с органической добавкой, что важно учитывать при настройке режимов питания в промышленных фотобиореакторах, например, в установках трубчатого типа или в системах с плоскопараллельными культуральными сосудами, где важно контролировать не только прирост биомассы, но и ее качественный состав.

### **1.1.1 Влияние температуры на урожайность микроводоросли хлореллы**

Изучение влияния абиотических факторов, в частности температуры, на продукционные процессы микроводорослей было проведено А. М. Музафаровым и Т.Т. Таубаевым. В ходе их исследований была выявлена четкая корреляция между температурным режимом культивирования и динамикой накопления клеточной массы *Chlorellavulgaris* (штамм 157). Экспериментальные данные показали, что при минимальных положительных температурах (в диапазоне от 5 до 10 градусов Цельсия) численность клеток

в суспензии составляла 2,7 млн на миллилитр, что свидетельствует о крайне замедленных метаболических процессах и переходе культуры в состояние анабиоза. По мере повышения температуры наблюдался экспоненциальный рост популяции: при нагреве среды до 10-15°C плотность достигла 12 млн/мл, при 15-20°C — 47 млн/мл. Дальнейшее увеличение температуры до 20-25°C позволило получить показатель в 89 млн/мл. Наивысшая продуктивность была зафиксирована в интервалах 25-30°C (122,5 млн/мл) и 30-32°C (127,3 млн/мл), что, по-видимому, соответствует оптимальному температурному режиму для работы ферментных систем данного штамма. Пиковые значения численности пришлись на узкий диапазон 32-34°C, где было зафиксировано максимальное количество — 127,4 млн/мл. Однако превышение этого порога (до 34-36°C) привело к угнетению культуры и снижению плотности до 118,6 млн/мл, что, вероятно, связано с денатурацией белковых комплексов и повышением затрат энергии на терморегуляцию [78, 80].

Иной подход к оценке температурного фактора был реализован В.В. Пиневицем в ходе полевых экспериментов 1965 года, проводившихся в условиях климата Ленинграда. В установках открытого типа, размещенных под прямым солнечным светом, средний выход биомассы хлореллы за период активной вегетации (с середины мая по конец августа) варьировал в пределах от 7 до 10 граммов сухого вещества на квадратный метр посевной площади. При этом колебания температуры окружающей среды в диапазоне от 14 до 22°C, согласно наблюдениям автора, не оказывали статистически значимого влияния на итоговую урожайность, что, вероятно, объясняется компенсаторным действием естественного освещения [78]. Однако в июле 1964 года был зафиксирован аномально низкий сбор биомассы, причиной которого стали экстремально высокие дневные температуры, вызвавшие, предположительно, эффект фотоингибирования и теплового стресса. Аналогичное падение продуктивности наблюдалось и в сентябре: среднесуточный прирост составлял всего около 4 граммов сухого вещества с

квадратного метра. Такое снижение было обусловлено комплексом причин, включающим как падение среднесуточных температур, так и воздействие ранних кратковременных заморозков, которые могли приводить к разрушению клеточных стенок при кристаллизации воды.

Для нивелирования негативного влияния низких температур и обеспечения стабильного круглогодичного производства в установках закрытого типа применяются системы искусственного облучения. В частности, для поддержания температуры на оптимальном уровне (в диапазоне 26 – 31°C) используются дуговые ртутные галогенные лампы (ДРИ). Эти источники света не только генерируют излучение в необходимой для фотосинтеза области спектра (активируя фотосистемы I и II), но и выделяют значительное количество тепловой энергии, что позволяет обогревать культуральную жидкость в холодное время года без дополнительных затрат. При проектировании таких установок важно учитывать необходимость теплоотвода, чтобы избежать перегрева суспензии в замкнутом объеме, для чего могут применяться теплообменники или системы водяного охлаждения, встраиваемые непосредственно в фотобиореактор.

### **1.1.2 Использование интенсивного перемешивания среды при культивировании хлореллы**

Кроме подбора наиболее питательной среды и повышения температуры для увеличения урожайности применяют перемешивание суспензии компрессором путем подачи воздуха в среду. Интенсивное перемешивание суспензии используют в совокупности с освещением, таким образом, старые и физиологически не активные клетки хлореллы не образуют на стенках емкостей светонепроницаемый плотный слой, который препятствует эффективному процессу фотосинтеза. В установках с интенсивным перемешиванием суспензии первоначальная плотность культуры составляет

не менее 1,5 млн. кл./мл. Но и чрезмерное увеличение плотности суспензии при засеве не увеличивает темпов роста культуры. Оптимальной плотностью засева в питательную среду для хлореллы вульгарис штамма 157 считается 2-5 млн. кл./мл. (20 -50 мг.сухого вещества на литр). Совместно с перемешиванием в среду подают и углекислый газ и азот.



Рисунок 1.1 – Биореактор для выращивания хлореллы с интенсивным перемешиванием, поддержанием оптимальной температуры и освещением

Исследования Г.И. Мелешко проливают свет на важнейший аспект газообмена в культурах микроводорослей, а именно — зависимость эффективности фотосинтеза от концентрации углекислого газа при различной плотности популяции. Было экспериментально установлено, что порог насыщения фотосинтетических процессов углекислотой напрямую коррелирует с количеством клеток в суспензии. Так, при относительно невысокой плотности (в диапазоне 100-150 млн клеток на миллилитр) насыщение наступает уже при содержании  $\text{CO}_2$  в газовой смеси на уровне 0,2%. Однако при увеличении плотности на порядок (до 4-5 млрд/мл) для достижения того же физиологического эффекта требуется значительно более высокая концентрация — от 4,5 до 5,5%. Это объясняется возрастающим совокупным потреблением углерода большим количеством клеток и необходимостью поддержания градиента диффузии газа из пузырьков в жидкость, а затем внутрь клеток.

Оптимальный выход биомассы, составляющий 1 грамм сухого вещества на литр суспензии, был зафиксирован при подаче газовой смеси с содержанием углекислоты 0,8%. Дальнейшее увеличение доли CO<sub>2</sub> до 5,8% не дало прироста продуктивности, что, вероятно, связано с наступлением лимитирования по другим факторам (например, по свету или доступности микроэлементов) либо с возможным подкислением среды при избытке углекислоты. Напротив, снижение концентрации до минимального порога в 0,2% приводило к двукратному падению урожайности, что подтверждает критическую роль углеродного питания в продукционном процессе [75].

Для практики массового культивирования в установках открытого типа, размещаемых под естественным освещением, важное значение имеют удельные расходные показатели. Наибольшая продуктивность в таких системах достигается при непрерывной подаче углекислого газа с интенсивностью от 0,05 до 0,1 литра на квадратный метр облучаемой поверхности в минуту. Эти цифры служат ориентиром при проектировании систем газоснабжения, где используются ротаметры для точной регулировки потоков.

В качестве наглядной иллюстрации данных закономерностей можно привести эксперимент с параллельным культивированием хлореллы на стандартной среде 04 в трех идентичных установках (схематически представленных на рисунке 1). Условия во всех трех аппаратах были унифицированы: среднесуточная температура суспензии поддерживалась в диапазоне от 26,3 до 33°C, а перемешивание осуществлялось с одинаковой интенсивностью, чтобы исключить влияние этих факторов на результат. Дифференцирующим параметром стала скорость подачи углекислого газа: в первой установке она составляла 0,02 л/м<sup>2</sup> в минуту, во второй — 0,05 л/м<sup>2</sup> в минуту, в третьей — 0,1 л/м<sup>2</sup> в минуту.

В течение первых трех суток эксперимента видимой разницы в развитии культур не наблюдалось — вероятно, на начальном этапе, при

низкой плотности клеток, имеющегося в среде карбонатного углерода и минимальной продувки было достаточно для покрытия метаболических потребностей. Однако по мере нарастания биомассы ситуация изменилась. На четвертый день плотность клеток в первой установке (минимальная подача CO<sub>2</sub>) составила 61,7 млн/мл, во второй — 71,3 млн/мл, в то время как в третьей, с максимальной аэрацией углекислотой, этот показатель достиг 83,4 млн/мл. К восьмому дню, когда культура вступила в фазу активного роста, дифференциация стала еще более выраженной: в первой установке зафиксировано 96,3 млн/мл, во второй — 138 млн/мл, а в третьей — 153 млн/мл. Эти данные наглядно демонстрируют, что на завершающих этапах цикла выращивания, при высокой плотности суспензии, культура предъявляет повышенные требования к газоснабжению, и лимитирование по углекислому газу может стать основным фактором, сдерживающим дальнейший рост [78].

Анализируя совокупность полученных данных, можно заключить, что регулирование подачи углекислого газа является более действенным инструментом управления продуктивностью, нежели такие приемы, как варьирование состава питательной среды (добавление органических и минеральных компонентов), повышение температуры сверх оптимальных значений или даже интенсивное перемешивание. Последние факторы, хотя и важны для создания гомогенных условий и предотвращения осаждения клеток, сами по себе, без адекватного углеродного обеспечения, не способны обеспечить устойчивого технологического эффекта и значительного прироста биомассы в системах массового культивирования.

### **1.1.3 Применение химических веществ в качестве катализаторов роста клеток хлореллы**

Современные подходы к интенсификации продуктивности микроводорослей, в частности хлореллы, все чаще базируются на

направленной модификации химического состава питательной среды. Введение специфических соединений, таких как ионы марганца, различные формы азота (аммиачная селитра, нитраты) и источники углерода (углекислый газ), позволяет существенно ускорить метаболические процессы в растительных клетках. Например, в протоколах культивирования, ориентированных на получение биомассы, ионы марганца выступают в роли кофакторов ферментов кислород выделяющего комплекса фотосистемы II, что напрямую влияет на эффективность фотосинтетических реакций.

В своих исследованиях Hopkins продемонстрировал, что даже незначительное увеличение концентрации марганца до уровня 0,2 миллиграмма на литр может стимулировать деление клеток настолько, что итоговый выход биомассы возрастает в диапазоне от десяти до ста раз по сравнению с контрольными образцами. Для практической реализации таких результатов в лабораторных условиях используются дозаторы микроэлементов, например, перистальтические насосы серии Masterflex, позволяющие с высокой точностью вносить концентрированные растворы солей в культиваторы.

Помимо микроэлементов, критически важным фактором является обеспечение углеродного питания. Подача диоксида углерода в фотобиореакторы замкнутого типа позволяет преодолеть лимитирующую стадию фотосинтеза, связанную с низкой концентрацией  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе. Насыщение среды происходит при растворении газа до концентраций порядка 0,01–0,027 процента. Исходя из этого, стандартное содержание углекислоты в воздухе (около 0,03 процента) действительно создает достаточный градиент для диффузии газа в жидкость и обеспечения потребностей водорослей в углероде. В промышленных установках, таких как трубчатые фотобиореакторы от поставщиков IndustrialPlankton или собственные разработки на основе мембранных газообменных модулей, процесс обогащения контролируется автоматическими газоанализаторами.

Что касается азотного питания, то работы Н. С. Гаевской указывают на оптимальные фоновые концентрации валового азота на уровне 15–17 миллиграммов на литр для таких распространенных объектов аквакультуры, как хлорелла и сценедесмус. Однако, если целью является не накопление биомассы, а получение культуральной жидкости с биостимулирующими свойствами для применения в животноводстве или растениеводстве, протокол меняется. В таких случаях предпочтительно использовать разбавленные питательные растворы. Одним из наиболее технологичных признан раствор 04, где концентрация азота искусственно повышена до 43 граммов на литр, что создает форсированный режим для синтеза аминокислот и фитогормонов. Усвояемость азота при этом зависит от его химической формы: аммиачный азот (например, в составе  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) считается наиболее предпочтительным для интенсивного культивирования, так как требует меньше энергозатрат клетки на его восстановление по сравнению с нитратной формой.

Значительный вклад в удешевление технологии внесла Н. С. Гаевская, обосновавшая возможность замены дорогостоящих реактивов класса «ч.д.а.» (чистый для анализа) на доступные минеральные удобрения сельскохозяйственного назначения. В ходе экспериментов была проведена корректировка рецептуры среды 04: сернокислый аммоний был заменен эквивалентным по азоту количеством аммиачной селитры, а в качестве источника фосфора вместо однозамещенного фосфорнокислого аммония стали использовать гранулированный суперфосфат. Из-за разницы в содержании действующего вещества и наличия балластных компонентов в удобрении, дозировку суперфосфата пришлось увеличить до 0,3 или даже 0,6 грамма на литр среды. Сама процедура внесения суперфосфата требует предварительного растворения и отстаивания для отделения гипса, что учитывается в технологических картах процесса.

Экспериментальная проверка эффективности модифицированных сред проводилась в остекленных наземных установках, конструктивно

напоминающих мелкотравчатые пруды или плоские горизонтальные фотобиореакторы. В первом варианте использовалась упомянутая модифицированная среда на основе аммиачной селитры и суперфосфата, во втором (контрольном) — классическая среда 04 на чистых солях. Технологический режим предусматривал толщину слоя суспензии 12 сантиметров, что оптимально для светопропускания при высокой плотности культуры. В качестве тест-объекта выступал штамм хлореллы 157. Культивирование велось в натуральных условиях: температура варьировалась от 20 до 36 градусов Цельсия, а освещенность достигала 108 тысяч люкс в пиковые солнечные часы, что соответствует яркому солнечному дню. Перемешивание суспензии, критически важное для предотвращения оседания клеток и равномерного газообмена, осуществлялось механическими мешалками в светлое время суток, с 8 до 19 часов. Анализ динамики накопления биомассы показал, что выход культуры на стационарную фазу роста (плато) происходит на шестые сутки. Продуктивность при этом оказалась практически идентичной: в установке с модифицированной средой получено 22,2 грамма, а в контроле — 22,6 грамма сухого вещества с квадратного метра в сутки. Благодаря доказанной эффективности и экономичности, этот адаптированный рецепт питательной среды в последние годы был внедрен и широко применяется в ряде хозяйств Узбекистана для получения кормовой микроводоросли.

Тем не менее, при всех достоинствах химических методов стимуляции роста, необходимо учитывать их потенциальную экологическую опасность. Вещества, вносимые в среду (особенно тяжелые металлы, подобные марганцу, и остаточные количества нитратов), склонны к биоаккумуляции. Процесс их накопления начинается в клетках хлореллы и далее по трофической цепи передается в организмы беспозвоночных и рыб, которых кормят этой биомассой. В конечном итоге это приводит к попаданию нежелательных соединений в организм сельскохозяйственных животных и человека. Поэтому для замкнутых систем аквакультуры, ориентированных на

получение пищевой продукции, все более актуальным становится поиск альтернативных, экологически безопасных методов стимуляции, либо разработка систем глубокой очистки готовой продукции.

#### **1.1.4 Роль искусственного освещения в повышении урожайности микроводоросли хлореллы**

Важным фактором при культивировании является применение искусственного освещения необходимого для интенсивности процесса фотосинтеза. Для освещения суспензии в настоящее время используют приборы облучательные светодиодные, источники теплого белого и холодного цвета M23FS300D2 и M23FS450D3, мощностью 300 – 450 Вт со световым потоком 50000 - 75000 люмен. Потребляемая энергия одной облучательной установки составляет соответственно 0,3-0,45 кВт\*ч.

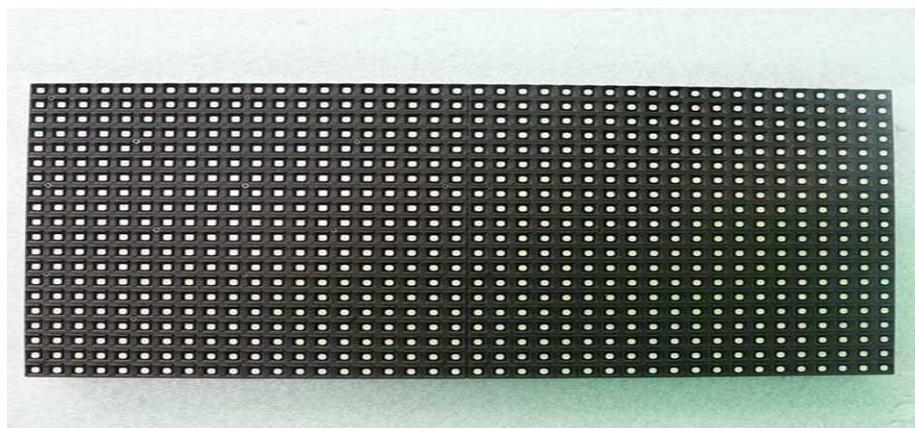


Рисунок 1.2 – Прибор облучательный светодиодный используемый для выращивания хлореллы.

Согласно литературным источникам темп роста культуры достигает максимума в пределах интенсивности освещения 50 - 70 тыс. люкс при температуре 25<sup>0</sup>С[78, 80].

Исходя из вышесказанного, можно установить, что процесс выращивания хлореллы под действием интенсивного освещения, возможно, является достаточно энергоемким и затратным производством. В связи с этим остается открытым вопрос повышения урожайности и уменьшения себестоимости водорослей.

### 1.1.5 Влияние площади высева на урожайность хлореллы

В последнее время получила распространение технология увеличение поверхностного слоя или площади высева хлореллы. Эта технология выращивания относится к установкам под «открытым небом». Для ее применения необходимо использование цементированных установок глубиной порядка 10–30см.

В Японии более-менее широкое распространение получили цементированные установки круглой и четырехугольной формы (рисунок 1.3). Толщина слоя питательной среды составляет 10 - 20см.



Рисунок 1.3 - Комплекс установок «под открытым небом» для массового производственного культивирования одноклеточных водорослей (Япония).

Некоторые исследователи полагают, что при выращивании в одних и тех же условиях урожай водорослей зависят от размеров установок[78].

Так, Каназава на установках с поверхностью 19,6 - 78,5м<sup>2</sup> получал в среднем 10 - 12,5г. сухого вещества в сутки, а Накамура на установке площадью 4000м<sup>2</sup> в это же время получил всего 2,5г сухого вещества в сутки[78]. Опыты показали, что дневной ход фотосинтеза хлореллы и сценедесмуса на различных питательных средах протекает неодинаково. Его величина для хлореллы вульгарис штамм 157 на органо-минеральной среде выше 19г./м<sup>2</sup> в сутки, а на минеральной ниже, чем на среде 04[8, 9].

Проведя анализ существующих технологий выращивания хлореллы, было установлено, что применение электрофизических эффектов для биостимуляции используется в крайне ограниченных случаях. Одним из интересных исследований в этой области являются разработки Суховского Никиты Сергеевича, посвященные влиянию электростатического поля на прирост микроводоросли хлореллы.

## **1.2 Электрофизические эффекты в сельском хозяйстве как факторы повышения урожайности сельскохозяйственных культур**

### **1.2.1 Стимуляция роста и развития микроорганизмов с использованием электромагнитных полей**

Проблематика воздействия внешних электромагнитных полей на жизнедеятельность микроорганизмов на протяжении нескольких десятилетий привлекает внимание научных коллективов по всему миру; в фокусе исследований находятся как стимулирующие, так и ингибирующие эффекты таких воздействий [30-56]. В частности, в работах Н.А. Глущенко детально изучалось влияние электронно-ионной обработки на популяции пивных дрожжей. Экспериментальная установка, по-видимому, представляла собой камеру с системой электродов, позволяющую создавать неоднородное электрическое поле с регулируемой напряженностью в диапазоне от 1 до 4 кВ/см. Анализ полученных данных показал, что доля нежизнеспособных

клеток (определяемая, например, методом окрашивания метиленовым синим) может изменяться под действием такой обработки, что открывает перспективы для целенаправленной корректировки физиологического статуса дрожжевой культуры и повышения ее технологической активности [30].

Иной подход к использованию электромагнитного излучения продемонстрировали R. Yusupov и G. Yusupova, сосредоточившись на обеззараживании зернового сырья. В их исследованиях применялось сверхвысокочастотное (СВЧ) поле, генерируемое, как правило, магнетронами с рабочей частотой 2450 МГц. Воздействие такого поля, основанное на диэлектрическом нагреве и специфических нетепловых эффектах, приводило к существенному подавлению грибковой микрофлоры, что позволяет рассматривать данный метод как альтернативу химическому протравливанию семян [31].

Крайне низкочастотные электромагнитные поля стали объектом изучения для коллектива авторов (М.А. Бабенкова, В.Т. Христюк, В.Е. Струкова), которые исследовали их влияние на виноградные дрожжи и сопутствующую микрофлору. Используя системы на основе катушек Гельмгольца для создания однородного поля, они установили, что эффект воздействия критически зависит от частоты. При магнитной индукции 0,9 мТл и частоте 16 Гц наблюдалась активизация роста и накопления дрожжевой биомассы, тогда как повышение частоты до 30 Гц приводило к угнетению развития уксуснокислых и молочнокислых бактерий, что, вероятно, связано с избирательным воздействием на ионные каналы и транспортные системы клеток [32].

Значительные результаты были получены польскими исследователями J. Lipiec, P. Janas и W. Barabasz при изучении влияния сильных магнитных полей на фитопатогены картофеля. Воздействие полями с индукцией 5, 10 и 15 Тл, создаваемыми, например, с помощью сверхпроводящих соленоидов, вызывало выраженное ингибирование роста таких микроорганизмов, как

*Erwiniacarotovora*, *Streptomycesscabies* и *Alternariasolani* соответственно. Причем для каждого вида патогена была выявлена своя пороговая индукция, вызывающая подавление [34].

Особый интерес представляют работы, демонстрирующие разнонаправленные эффекты в зависимости от параметров поля. Например, при изучении бактерии *Escherichiacoli* одни исследователи фиксировали стимуляцию деления под действием постоянного или переменного электрического поля [30,32], в то время как другие обнаруживали мутагенный эффект, вызванный воздействием переменного магнитного поля [40]. Такая варибельность результатов подчеркивает необходимость тщательного контроля всех параметров облучения, включая форму сигнала, экспозицию и условия культивирования после обработки.

Целый ряд работ посвящен воздействию постоянных магнитных полей на фотосинтезирующие микроорганизмы. Так, коллектив ученых под руководством М. Hirano, А. Ohta, К. Abe и других изучал реакцию цианобактерий на статическое поле. В ходе экспериментов было установлено, что экспозиция *Spirulinaplatensis* в поле с индукцией 10 мТл дает прирост биомассы на 50%, а увеличение индукции до 250 мТл, напротив, снижает стимулирующий эффект до 22% [50,51]. Аналогичная закономерность наблюдалась и для *Anabaenadolium*, где поле в 300 мТл также вызывало ускорение роста [52].

Исследователи из азиатских стран (Н. Wang, Х. Zeng, S. Guo и соавторы) сосредоточились на микроводорослях, представляющих интерес для биотехнологии. В их экспериментах обработка *Chlorella vulgaris* и *Chlorellasp.* постоянным магнитным полем в диапазонах 10–35 мТл и 6–58 мТл соответственно приводила к увеличению выхода биомассы [53,54]. Наиболее впечатляющий результат был получен для *Dunaliellasalina*, одноклеточной водоросли, устойчивой к высоким концентрациям солей: воздействие полем 10–23 мТл обеспечило 90-процентный прирост продукции [55]. В качестве возможных механизмов обсуждаются изменения

проницаемости мембран для ионов кальция и активация антиоксидантных ферментов.

В отечественной науке значительный вклад в изучение данного направления внес Н.А. Суховский, который целенаправленно исследовал влияние электростатического поля на хлореллу. Им были экспериментально подобраны параметры, обеспечивающие максимальный эффект: напряженность поля 75 кВ/м (при подаваемом напряжении 15 кВ) и продолжительность обработки 72 часа. Применение такого режима позволяет, по утверждению автора, удвоить производительность культиватора. Более того, для реализации процесса был разработан специализированный электростатический биореактор и соответствующий технологический регламент [55-60, 91]. Однако, несмотря на высокую эффективность, предложенное решение обладает рядом ограничений, сдерживающих его широкое внедрение в сельскохозяйственную практику. Основным препятствием служит необходимость кардинальной модернизации или полной замены существующего парка оборудования биофабрик, что сопряжено со значительными капитальными затратами на приобретение и установку новых биореакторов, а также с обеспечением надежной изоляции высоковольтных узлов и защитой персонала.

### **1.2.2 Стимуляция ростовых процессов растений и повышение посевных качеств семян с помощью озона**

Анализ доступных электрофизических методов воздействия не позволяет сделать однозначный вывод о безусловном приоритете предпосевной обработки электрическими или магнитными полями, а также электрохимически активированными (ЭХА) растворами в вопросе максимизации урожайности. В работах отечественных и зарубежных авторов подчеркивается, что перечисленные способы выступают преимущественно в роли катализаторов ростовых процессов, однако их эффективность в

контексте подавления патогенной микрофлоры и снижения пораженности насекомыми-вредителями остается невысокой. Между тем, такой важнейший показатель, как посевные качества, особенно для такой культуры, как кукуруза, напрямую коррелирует с фитосанитарным состоянием семенного материала.

В этой связи особый интерес представляет озон, чьи бактерицидные свойства и механизмы воздействия подробно описаны в научной литературе. Ряд исследователей, например, [68, 85], обоснованно полагают, что озонирование может быть более перспективной технологией по сравнению с упомянутыми электрофизическими методами, поскольку оно сочетает в себе функции оксиданта и дезинфектанта.

С химической точки зрения, озон представляет собой аллотропную модификацию кислорода ( $O_3$ ). В газообразном состоянии при нормальных условиях он проявляет высокий окислительный потенциал, что и обуславливает его способность эффективно подавлять развитие микрофлоры. Ключевым преимуществом данного реагента является его экологическая безопасность: вступая в реакцию с органическими субстратами, он инициирует образование нестабильных озонидов, которые быстро распадаются, а сам газ, выполнив свою функцию, рекомбинирует в молекулярный кислород, не оставляя токсичных остатков, требующих утилизации.

Механизм летального действия озона на клетку заключается в его мощной окислительной атаке на клеточные мембраны и внутриклеточные структуры. Он легко вступает в реакции с ненасыщенными жирными кислотами липидного бислоя, нарушая его барьерную функцию. Далее, проникая в цитоплазму, озон вызывает необратимые повреждения органелл и ядерного аппарата, что, в конечном счете, приводит к гибели бактериальной или грибковой клетки [68, 74].

Экспериментальные данные, полученные Чистяковым Е.М., Рубенчиком А.Я. и Кудлай В.И., подтверждают высокую эффективность

ионизированного воздуха. В ходе их исследований воздействие потоков аэроионов на фитопатогены, такие как *Bacillus subtilis* и *Pectrobacterium*, приводило к практически полной деструкции колоний: гибель 80-90% клеток фиксировалась уже после двух часов экспозиции [16, 56, 83-89, 118, 144-146]. Была выявлена четкая обратная зависимость: чем дольше длилась обработка культуры *Candida utilis*, тем ниже оказывалась ее выживаемость [17]. Аналогичная картина наблюдалась и в отношении мицелиальных грибов — двухчасовая обработка положительными аэроионами уничтожила 90% *Fuzarium sambucinum* и более 70% *Botrytis cinerea*. В работах Сольвах З.Х. также подтверждается способность озона подавлять развитие как бактериальной, так и плесневой микрофлоры [16, 56, 83-89, 118, 144-146].

Тем не менее, важно отметить, что спектр чувствительности микроорганизмов к озону не абсолютен. Исследования показывают, что наряду с высокочувствительными формами (кокки, кишечная палочка, спорообразующие бактерии, ряд плесеней) существуют устойчивые штаммы, которые демонстрируют слабую реакцию или полную резистентность к обработке озоном [74, 85].

В результате предпосевной обработки семян озоновоздушной смесью, как показывают многочисленные полевые и лабораторные опыты [22, 102-106, 118, 148], наблюдается комплексный положительный эффект. Во-первых, происходит санация поверхности семян: озон эффективно снижает обсемененность патогенами, что минимизирует риск развития корневых гнилей и других заболеваний на начальных этапах вегетации. Во-вторых, отмечается физиологический эффект — озон в сублетальных концентрациях выступает в роли триггера, активирующего метаболические процессы в зародыше, что стимулирует его дальнейший рост. Совокупность этих факторов способна обеспечить прибавку урожайности, которая в ряде задокументированных случаев превышает 30%.

Однако определяющим фактором эффективности является доза обработки. Это наглядно продемонстрировано в работе Foy C.D. и Lee E.H.,

которые изучали реакцию сои на озонирование в фазе тройчатого листа в условиях замкнутой камеры [150]. Примененный режим (доза 0,25 мкл/л, три цикла по 3 часа) оказался токсичным для растений: через двое суток визуально диагностировались некротические повреждения тканей. Данный случай классифицируется как передозировка, что подтверждает необходимость строгого контроля параметров обработки.

Влияние дозы на всхожесть детально исследовали Резчиков В.Г., Чурмасов А.В., Гаврилов А.А., Соколова Е.А. в экспериментах с семенами гороха полевого и облепихи [109, 110]. Для гороха, обработанного при концентрации 0,5 мг/м<sup>3</sup> с варьированием времени от 0 до 120 минут, наилучший результат (превышение контроля на 16%) был достигнут при определенной экспозиции. Для облепихи использовался более широкий диапазон концентраций (0,15; 0,3; 0,9 г/м<sup>3</sup>) и временных интервалов (10, 20, 40 мин). Анализ полученных данных позволил сформулировать закономерность: превышение оптимальной дозы (передозировка) ингибирует ростовые процессы, в то время как дозы в определенном диапазоне оказывают стимулирующее действие. Таким образом, можно предположить, что для достижения положительного агрономического эффекта необходимо либо кратковременное воздействие высококонцентрированной смесью, либо пролонгированная обработка низкими концентрациями озона.

Учеными Русских Г.А. и Токмаковым Н.М. на тепличном комбинате ЗАО «Красногорский» в г. Кирове в 2003 году были проведены исследования по влиянию озона на рост, развитие и урожайность растений гибрида огурца F<sub>1</sub>Тополек[85, 118]. Эксперимент заключался в следующем: в одной из теплиц блока, начиная с 16.07.2003, проводили поливы, озонированной водой. Концентрация озона в поливной воде составляла 0,2мг/л. Полив озонированной водой производили до конца вегетации культуры (два месяца). Основные данные, полученные в ходе эксперимента, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Сравнительная продуктивность тепличного огурца при поливе обычной и озонированной водой.

| <b>С начала посадки и до 15.07.2003 (полив технической водой всех теплиц)</b>            |  |   |                           |
|--|--|---|---------------------------|
| <b>Продукция</b>   | <b>Экспериментальная теплица (O<sub>3</sub> + O<sub>2</sub>)</b> | <b>Среднее значение по тепличному блоку</b> | <b>+/- к средн. знач.</b> |
| Стандартная  | 21323  | 20969                                       | 354                       |
| Нестандартная  | 4447   | 3471  | 976                       |
| <b>Итого</b>   | <b>25770</b>   | <b>24440</b>                                | <b>1330</b>               |
| <b>С 16.07.2003 и до удаления растений (полив озонированной водой в опытной теплице)</b> |  |   |                           |
| <b>Продукция</b>   | <b>Экспериментальная теплица (O<sub>3</sub> + O<sub>2</sub>)</b> | <b>Среднее значение по тепличному блоку</b> | <b>+/- к средн. знач.</b> |
| Стандартная  | 9184   | 6548  | 2636                      |
| Нестандартная  | 2058   | 1699  | 359                       |
| <b>Итого</b>   | <b>11243</b>   | <b>8247</b>                                 | <b>2996</b>               |
| <b>За весь сезон 2003 года</b>   |  |   |                           |
| <b>Продукция</b>   | <b>Экспериментальная теплица (O<sub>3</sub> + O<sub>2</sub>)</b> | <b>Среднее значение по тепличному блоку</b> | <b>+/- к средн. знач.</b> |
| Стандартная  | 30508  | 26386                                       | 4122                      |
| Нестандартная  | 6505   | 5020  | 1485                      |
| <b>Итого</b>   | <b>37013</b>   | <b>31406</b>                                | <b>5607</b>               |

В 2007 году Русских Г.А. и Токмаковым Н.М., совместно с участием специалистов ГНУ Кировской ООС ВНИИО РАСХН в теплицах ЗАО «Красногорский» исследовалось влияние озонозащитной смеси на весь процесс развития растений огурца от семян до окончания вегетации (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Проращивание семян огурца. В чашке Петри слева – семена, замоченные в обычной воде, справа – семена, замоченные в озонированной воде.

Полив озонированной водой проводили один раз в день из расчета 0,5 л/растение. Воду озонировали в течение 20 – 30 минут и сразу же использовали ее для полива во избежание распада озона. Исследования показали, что растения, обработанные в рассадный период, были более крепкими, имели большую высоту, а цвет листьев у них был интенсивно-зеленым – более насыщенным, чем в контроле.

Таблица 1.2. Биометрические характеристики растений огурца, орошая их озонированной водой в возрасте 20 дней.

| Вариант                          | Контроль<br>(техническая вода) | Опытная партия №1<br>(O <sub>3</sub> + воздух) | Опытная партия<br>№2 (O <sub>3</sub> + O <sub>2</sub> ) |
|----------------------------------|--------------------------------|--|---|
| Высота растения, см              | 12,6                           | 16,4   | 17,6  |
| Число листьев, шт.               | 4,2                            | 3,8  | 4,0   |
| Длина междоузлий, см             | 8,4                            | 10,1   | 10,8  |
| Площадь листьев, см <sup>2</sup> | 119                            | 146  | 153   |
| Масса листьев, г                 | 8,1                            | 9,5  | 10,9  |
| Масса стебля, г                  | 6,3                            | 6,8  | 8,2   |
| Длина корней, см                 | 38                             | 39   | 44  |
| Объем корней, мл                 | 4,2                            | 4,0  | 3,4   |
| Масса корней, г                  | 3,6                            | 5,9  | 4,4   |

Положительные результаты обработки микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111 воздушной смесью насыщенной озоном получили в 2016 исследователи Нормов Д.А. и Шуськин Е.И.[87, 88, 89] ими были проведены эксперименты показавшие эффективность озонирования для роста и развития микроводоросли. Однако при проведении эксперимента было установлено, что при общем положительном эффекте озонирования повышение температуры озон - воздушной смеси используемой для барботации даже на 5-10 градусов отрицательно сказывается на результате[87, 88].

На основании анализа вышеизложенных научных исследований можно сделать вывод, что использование озона в технологиях выращивания сельскохозяйственных растений с определёнными концентрациями, зависящими от особенностей обрабатываемых растений и периода их

развития, положительно влияет на физиологические процессы в растениях [90, 101, 143]. Вместе с тем высокие концентрации озона, по мнению многих ученых, негативно влияют на рост и развитие растений. Поэтому при исследовании воздействия озона на определённый вид сельскохозяйственного растения необходимо в первую очередь тщательное изучение физиологических особенностей растения и технологии его выращивания.

### **1.2.3 Биотехнология выращивания суспензии хлореллы**

Процесс культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris*, штамм ИФР № С-111, инициируется с этапа приготовления жидкой питательной среды. Ее состав, согласно регламенту, должен включать не только макро- и микроэлементы, но и растворенные газовые компоненты, необходимые для начального метаболизма [27, 79, 80, 81, 115]. Базовой основой служит среда Тамийя, для приготовления которой в стерильный сосуд, например, в стеклянный баллон или реактор объемом, соответствующим масштабу производства, производится заливка водопроводной или дистиллированной воды, предварительно нагретой до 26–30°C. При смешивании компонентов строго соблюдается очередность внесения солей, предусмотренная методикой, а после добавления каждого реактива раствор подвергается тщательному перемешиванию для предотвращения образования нерастворимых осадков и локальных перенасыщений.

В качестве посевного материала используется маточная культура хлореллы, которая вносится в подготовленную среду в объемном соотношении 1:5, что эквивалентно 20% от общего рабочего объема культиватора. Критическим параметром качества инокулята является его оптическая плотность, которая не должна превышать значения 1,4. Методика точного измерения данного показателя с использованием фотоэлектроколориметра подробно описана в фундаментальных работах

М.Г. Владимировой и В.Е. Семененко, где также рассматриваются корреляции между плотностью суспензии и фазой роста культуры [80].

Непосредственно культивирование стартует с момента включения системы искусственного облучения. В качестве источников света применяются мощные газоразрядные лампы, такие как ДРЛФ (дуговые ртутные люминесцентные) или ДРИ (дуговые ртутные с йодидами), которые способны обеспечить необходимый световой поток. Интенсивность облучения поддерживается на уровне 30 тысяч люкс, что соответствует оптимальным условиям для фотосинтеза. Поддержание фотопериода является ключевым фактором: продолжительность светового периода в суточном цикле должна составлять 16–18 часов. Температура суспензии в течение всего цикла строго контролируется и поддерживается в референтном диапазоне 28–30°C, так как выход за эти пределы может ингибировать ферментативные системы клетки.

Цикл развития клеток штамма ИФР № С-111 имеет четкую суточную ритмику. В светлое время суток, примерно с 6 до 21 часа, за счет энергии фотонов запускаются реакции фотосинтеза, что сопровождается активным синтезом белка и углеводов. В этот период наблюдается увеличение линейных размеров клеток с 1,5 до 9 мкм, то есть идет накопление биомассы. Процесс цитокинеза, или непосредственного деления материнской клетки на дочерние автоспоры, приходится на темное время суток — период с 22 часов вечера до 4 часов утра [80, 81].

В ходе четырехсуточного цикла наращивания биомассы в культуральную среду ежедневно дозированно вводится углекислый газ, который служит единственным источником углерода для фототрофного роста. Подача CO<sub>2</sub> может осуществляться из баллонов или через генераторы чистого газа, при этом важно контролировать его расход и чистоту. На финальной стадии, к четвертым суткам, производится оценка готовности суспензии к использованию или сбору урожая. Контроль осуществляется с помощью фотоэлектрического фотометра КФК-2. Измерения проводятся по

двум показателям: оптической плотности, эталонные значения которой должны находиться в интервале 1,4–1,8, и коэффициенту светопропускания, который для готовой суспензии составляет всего 2–4%, что свидетельствует о высокой концентрации клеток.

Прибор КФК-2, задействованный в данном технологическом процессе, представляет собой колориметр, работающий в видимом диапазоне спектра. Он предназначен для количественного анализа жидких сред путем измерения отношения световых потоков. Его применение в данном случае базируется на способности регистрировать мутность суспензии, которая прямо пропорциональна массе клеток. Важно отметить, что сам фотометр имеет широкий спектр применения, включая клиническую диагностику, контроль качества воды на станциях водоподготовки, анализ в металлургической и пищевой промышленности, однако в данном контексте он служит узкоспециализированным инструментом биотехнолога.

Сама технология получения биомассы организована по непрерывному (проточному) циклу. Это означает, что процесс не останавливается для полной выгрузки; ежедневно из общего объема изымается часть готовой суспензии, предназначенная, например, для выпаивания сельскохозяйственных животных, а освободившийся объем замещается свежей питательной средой. Такая схема позволяет поддерживать культуру в экспоненциальной фазе роста.

В контексте поиска путей интенсификации продуктивности хлореллы перспективным направлением видится применение газообразного озона. Можно предположить, что кратковременная барботация культуральной жидкости озоновоздушной смесью со строго определенными параметрами (концентрация озона и экспозиция), проведенная в интервале между завершением фазы питания клеток и началом массового деления, способна оказать стимулирующий эффект. Предположительно, умеренный окислительный стресс может активировать защитные механизмы и ускорить

метаболические процессы, что в итоге приведет к приросту плотности суспензии и увеличению выхода конечной биомассы.

### **1.3 Современные установки для получения озона и их технические характеристики**

История развития озонотехники берет свое начало в середине XIX века. В 1857 году была сконструирована индукционная трубка, ставшая прообразом первого генератора озона. Уже вскоре, благодаря усилиям фирмы «Сименс», эта разработка нашла практическое воплощение в установке для обеззараживания питьевой воды [73]. На протяжении последующих десятилетий конструкции озонаторов непрерывно совершенствовались, расширялся и круг решаемых с их помощью задач. Интенсивные исследования, проводимые в России и зарубежных странах в последние десятилетия, были направлены на повышение эффективности и надежности озонаторного оборудования. Значительных успехов удалось добиться в создании мощных генерационных систем, функционирующих на основе барьерного или тихого электрического разряда в газовом промежутке. Тем не менее, комплекс проблем, связанных с конструктивной адаптацией озонаторов под специфические нужды агропромышленного комплекса, все еще остается открытым. В частности, для применения в технологических циклах, подобных культивированию микроводорослей, требуются устройства с особыми характеристиками. Проведем детальный анализ технических параметров и конструктивных решений, реализованных в существующих электроозонаторах.

Классификация озонаторных установок по их производительности традиционно подразделяет их на три основные категории. К первой группе (малой производительности) относятся аппараты, генерирующие до одного килограмма озона в час. Ко второй (средней) — установки с диапазоном выхода от одного до десяти килограммов в час. Третью группу (крупные озонаторы) составляют промышленные системы, производительность которых превышает десять килограммов озона за час непрерывной работы. С точки зрения

конструктивного исполнения разрядных блоков, современные генераторы можно систематизировать по ряду признаков, основным из которых является геометрия электродов и тип диэлектрика. Схематичное представление такой классификации, основанной на анализе источников [14, 23, 73], позволяет выделить трубчатые, пластинчатые и поверхностно-разрядные конфигурации.



Рисунок 1.6 - Классификация генераторов озона

Современный рынок предлагает широкий ассортимент компактных генераторов озона, позиционируемых преимущественно как средства для обеззараживания воздушной среды в помещениях различного назначения. Однако применение подобных устройств для барботажа жидких питательных сред, например, в процессе выращивания хлореллы, наталкивается на серьезные ограничения, продиктованные их конструктивной спецификой. В качестве примера можно привести серийно выпускаемые модели малой производительности, такие как Озон-01П, Озон-5П и Озон-60П. Их конструкция, ориентированная на обработку воздуха в открытом пространстве, не предусматривает герметичного подключения к системе подачи газа в жидкость под избыточным давлением (рисунок 1.7).

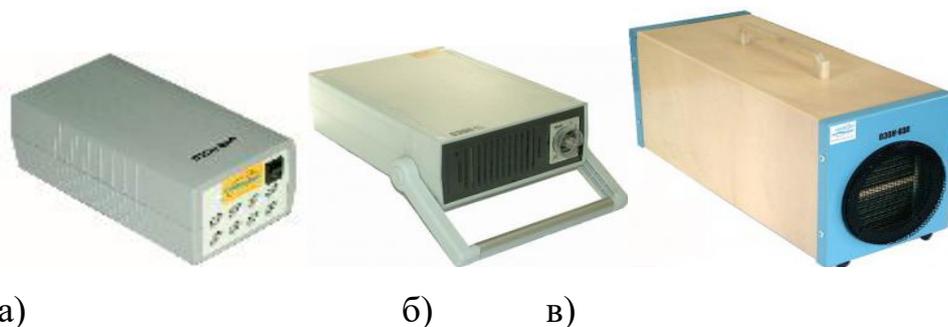


Рисунок 1.7 – Внешний вид озонаторов малой производительности по озону:  
а) Озон-01П, б) Озон-5П, в) Озон-60П.

Для интенсификации процессов культивирования хлореллы, протекающих в толще водной среды, наиболее рациональным представляется использование генераторов, интегрированных в герметичную пневматическую схему. Такая схема должна обеспечивать нагнетание озонозодушной смеси непосредственно в столб жидкости с помощью компрессорного оборудования. Анализ номенклатуры выпускаемых герметичных озонаторных систем показывает, что они, как правило, ориентированы на крупнотоннажное промышленное производство. Эти установки функционируют на основе сжатого воздуха, прошедшего глубокую очистку от аэрозолей и тщательную осушку до низких значений точки росы. Производительность подобных систем варьируется в очень широком диапазоне — от 10 граммов до 25,8 килограмма озона в час. Столь высокие показатели достигаются за счет значительных энергозатрат (от 0,2 до 340 кВт) и больших габаритных размеров оборудования, что делает их эксплуатацию в условиях небольшой лаборатории или фермерского хозяйства экономически и технически нецелесообразной.

Конструкция разрядных устройств подавляющего большинства промышленных озонаторов базируется на трубчатых элементах, напоминающих по принципу действия озонаторы Сименса. Такая конфигурация обеспечивает высокую удельную производительность, однако требует разветвленной инфраструктуры. Обязательными компонентами являются система подготовки воздуха (фильтрация, осушка, регулировка давления) и система жидкостного охлаждения разрядных элементов для отвода тепла, выделяющегося в зоне микрозарядов.

Таблица 1.3 – Технические характеристики промышленных озонаторов

| Озонатор   | П-60 | П-90 | П-120 | П-160 | П-198 | П-270 | П-379 | П-514 | П-647 | П-850 |
|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Производительность по озону, кг/час, не менее          | 1.5  | 2.6  | 3.6   | 4.8   | 6.6   | 8.3   | 11.5  | 15.6  | 19.6  | 25.8  |
| Давление рабочее ОВС, МПа, не более                    | 0.07 | 0.07 | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  |
| Мощность потребляемая, кВт, не более                   | 15   | 35   | 50    | 65    | 90    | 110   | 150   | 205   | 260   | 340   |
| Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /час, не более | 7    | 18   | 20    | 25    | 36    | 48    | 64    | 82    | 97    | 125   |
| Расход воздуха, м <sup>3</sup> /час, не более          | 75   | 130  | 180   | 240   | 330   | 415   | 575   | 780   | 980   | 1290  |

Резюмируя обзор существующих технических решений, можно констатировать, что отечественная промышленность в основном ориентирована на выпуск крупногабаритных озонаторных станций высокой единичной мощности. Эти комплексы отличаются высокой стоимостью, сложностью монтажа и сервисного обслуживания, а также требовательностью к условиям эксплуатации, что существенно ограничивает сферу их применения.

В контексте использования озона как биотического фактора, потенциально способного ускорить пролиферацию клеток хлореллы, возникает объективная потребность в разработке специализированного генератора. Такой аппарат должен характеризоваться доступной ценой, простотой конструкции и неприхотливостью в эксплуатации, исключающей необходимость в сложных системах подготовки воздуха. При рассмотрении возможности применения озонатора пластинчатого типа для продувки жидких сред необходимо учитывать теплофизические аспекты процесса. При работе в герметичном контуре, когда озоновоздушная смесь подается

непосредственно в жидкость, разрядная камера оказывается в условиях недостаточного конвективного охлаждения. Объем прокачиваемого через разрядный промежуток воздуха (выступающего в роли теплоносителя) зачастую невелик, и его теплоемкости недостаточно для эффективного отвода джоулева тепла. 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, сводя на нет 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 °С), 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.

#### **1.4 Выводы и задачи исследования**

Обзор литературных источников показал, что в настоящее время современные технологии стимулирования ростовых процессов микроводоросли хлореллы опираются на механические, физические, светотехнические и химические методы стимуляции. Химические методы являются наиболее эффективными по сравнению с остальными. Однако, использование в качестве катализаторов роста хлореллы химических

веществ, вероятно, не является экологически чистой технологией, так как эти вещества, накапливаются в клетках микроводоросли, а, следовательно, и в тканях выращиваемых животных, что в дальнейшем негативно сказывается на потребителях сельскохозяйственной продукции, то есть на гражданском населении.

Проведя анализ существующих технологий выращивания хлореллы, было так же установлено, что использование электрофизических способов стимуляции роста и развития микроводоросли разработано недостаточно, а имеющиеся разработки имеют значительные недостатки. Следовательно, определение параметров электроозонной технологии стимулирования микроводоросли хлореллы является актуальной задачей.

**С целью** определения эффективных параметров разрядного блока электроозонатора и технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы были определены следующие **задачи исследования**:

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

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

3. Получить регрессионные модели влияния параметров электроозонирования на концентрацию клеток хлореллы и оптическую плотность раствора суспензии.

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

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЮ СУСПЕНЗИИ ХЛОРЕЛЛЫ**

### **2.1 Технологический процесс электроозонной обработки хлореллы**

Как было отмечено выше, традиционная технология выращивания хлореллы включает в себя: подготовку питательной среды с оптимальной температурой, подпитку этой среды минеральными и органическими удобрениями, тщательное перемешивание получившегося раствора, систему искусственного освещения суспензии для интенсификации процесса фотосинтеза и т.д.

На основании детального рассмотрения существующей биотехнологии выращивания зелёной хлореллы была разработана схема технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы представленная на рисунке 2.2.

Представленный технологический процесс обработки суспензии озоновоздушной смесью включает в себя как стадии традиционной технологии выращивания хлореллы, так и стадии направленные на производство озона и подачи его в питательную среду. Рассмотрим процесс производства озона. Воздух поступает в газоразрядный промежуток с помощью компрессора, с производительностью по воздуху 2,3 л/с и соединён посредством гибкого трубопровода с генератором озона герметичной системы, который создает определенную скорость воздушного потока при прохождении газоразрядного промежутка. Под действием напора, создаваемого компрессором, озоновоздушная смесь поступает по гибким пластиковым трубкам из силиконового каучука в рассекатели из белого точильного камня с диаметром пор около 0,1мм, закреплённые на конце трубок, погружённых в ёмкости объёмом 10 литров каждая с раствором суспензии хлореллы (рисунок 1.1).

Ёмкости оснащены датчиками температуры (термопары) для контроля над температурой питательной среды.



Рисунок 2.1 – Мелкопористые диффузоры (распылители): а) из белого точильного камня, б) керамические.

В питательной среде, в результате воздействия диффузоров, происходит процесс аэрации, то есть искусственного насыщения среды озоновоздушной смесью посредством перемешивания водных масс (циркуляции воды). Процесс фотосинтеза поддерживается путём искусственного освещения ёмкостей.

Из предложенного технологического процесса (рис 2.2) ясно, что на развитие биомассы хлореллы оказывает влияние несколько факторов, таких как температура, давление воздуха подаваемого в электроозонатор, освещённость и площадь высева клеток, так же как концентрация озона в озоновоздушной смеси в ёмкости, а так же длина и сечение магистрали трубопровода. Традиционная биотехнология культивирования исследуемого штамма хлореллы предполагает поддержание температуры питательной среды на оптимальном для роста и развития клеток уровне (28-30°C), то для эффективного воздействия обработки температура озоновоздушной смеси, вносимая в среду не должна превышать установленного диапазона температур. Кроме этого необходимо упомянуть, что газоразрядный блок

озонатора находится в герметичной емкости и воздухообмен имеет постоянное значение недостаточное для удаления избыточного нагрева и при температурах озонозодушной смеси свыше 30<sup>0</sup>С значительно возрастает коэффициент разложения озона, что не позволяет достигнуть требуемых концентраций озона в озонозодушной смеси поступающей в обрабатываемую среду.

Газоразрядный промежуток состоит из системы плоских электродов, к которым подается импульсное напряжение. Под воздействием электрического поля происходит газовый разряд. В результате на выходе газоразрядного промежутка получаем смесь воздуха и озона. Полученный озон имеет определенную концентрацию и температуру, которые взаимосвязаны. Рассмотрим процесс получения озона и определим, как связаны параметры газоразрядного процесса и конструктивные характеристики озонатора. Кроме этого, с целью нахождения рациональных значений и соотношений между такими факторами, как температура озонозодушной смеси и режимными параметрами работы газоразрядного промежутка, длины участка магистрали и коэффициента распада озона на поверхности воздуховода, произведём соответствующие расчёты.

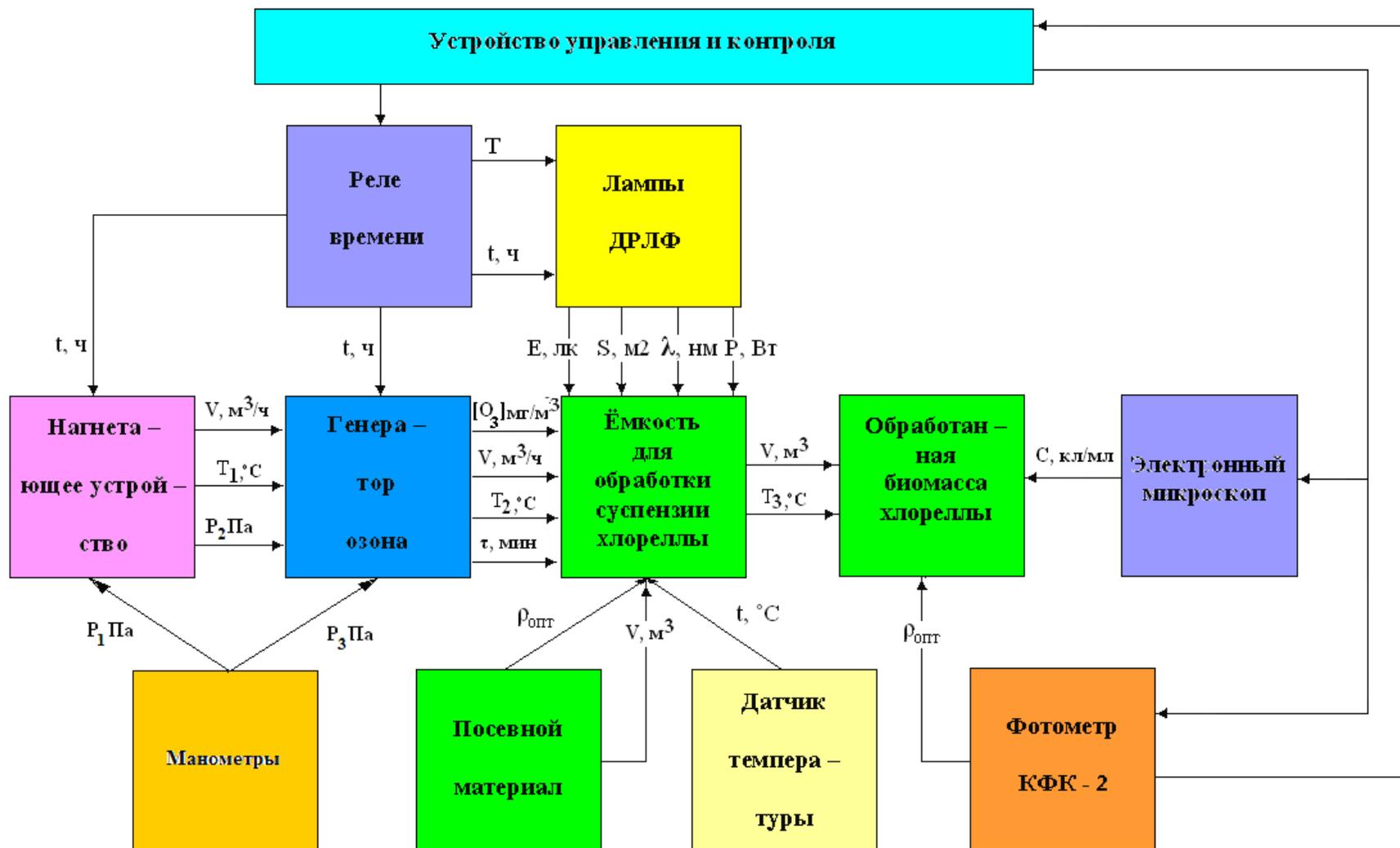


Рисунок 2.2 - Схема технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы

Так как традиционная биотехнология культивирования исследуемого штамма хлореллы предполагает поддержание температуры питательной среды на оптимальном для роста и развития клеток уровне (28-30°C), то для эффективного воздействия обработки температура озонозооной смеси, вносимая в среду не должна превышать установленного диапазона температур.

## **2.2. Термодинамический расчет электроразрядной ячейки электроозонатора.**

Таким образом, перед нами ставится задача поддержание оптимальной температуры в питательной среде в независимости от сообщённой разрядным устройством количества теплоты озонозооной смеси.

Представим разрядный промежуток как канал, по которому движется воздух с постоянной скоростью  $u$ . В определенной области на него действует электрический заряд, который нагревает газ. При этом происходит химическая экзотермическая реакция синтеза озона. Одновременно с этим воздух охлаждается через стенки канала. Примем процесс стационарным, то есть температура меняется вдоль длины разрядного промежутка (координата  $x$ ) в каждой конкретной точке. Предполагаем, что температура равномерна по сечению канала и изменяется только вдоль его длины  $x$  и по времени  $t$  рисунок 1. Выделим малый элемент объема газа длиной  $dx$  и площадью поперечного сечения  $S$ . Считаем процесс стационарным, то есть температура меняется только вдоль длины разрядного промежутка (координата  $x$ ), но не изменяется со временем в каждой конкретной точке.

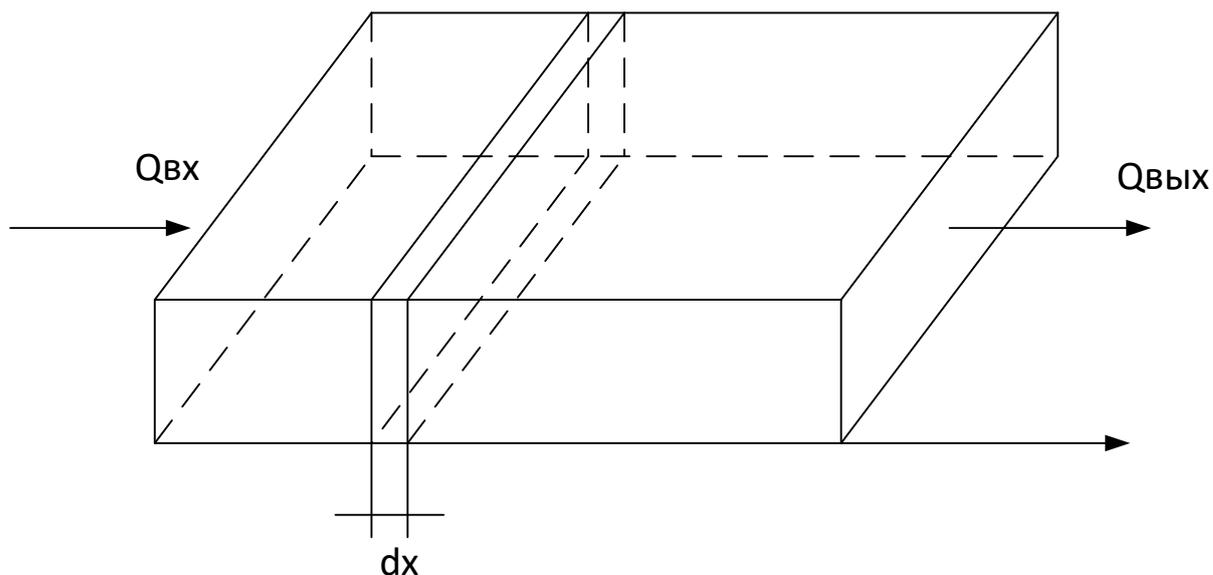


Рисунок 2.3 – воздушный поток проходящий через разрядный промежуток

Выделим малый элемент объема газа  $dx$  площадью поперечного сечения  $S$

Тепловой поток или энергия входящая в объем

$$Q_{ВХ}(x) = m \cdot c_p \cdot T(x) \quad (2.1)$$

где  $m$  – массовый расход воздуха, кг/с

$$m_p = \rho \cdot u \cdot S \quad (2.2)$$

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>.

Тепловой поток или мощность, выходящая из рассматриваемого объема

$$Q_{ВЫХ}(x + dx) = m \cdot c_p \cdot T(x + dx) \quad (2.3)$$

Изменение теплового потока (мощности) в рассматриваемом объеме

$$Q_{ВХ}(x) - Q_{ВЫХ}(x + dx) = -m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dx} dx \quad (2.4)$$

Согласно закону сохранения энергии это изменение должно быть равно сумме всех источников и потребителей тепла (энергии) внутри элементарного объема.

Источником тепла является электрический разряд. Мощность разряда выделяемая в рассматриваемом объеме, определяется

$$P_1 = P_p \cdot S \cdot dx \quad (2.5)$$

где  $P_p$  – мощность электрического разряда на единицу объема, зависящая от температуры и плотности озонородушной смеси, Вт/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения канала, по которому движется озонородушная смесь, м<sup>2</sup>.

Кроме того, источником тепла (энергии) является процесс протекающий в экзотермической реакции синтеза озона. При экзотермической реакции образования озона изменение энтальпии имеет отрицательное значение.

Мощность выделяемая в объеме

$$P_2 = -\Delta H \cdot v(x) \cdot S \cdot dx \quad (2.6)$$

где  $\Delta H$  – изменение энтальпии или теплоты реакции синтеза озона, Дж/моль;

$v(x)$  – скорость реакции или изменение концентрации озона, моль/(м<sup>3</sup>с).

Для озона энтальпия положительна, так как энергия требуется для разрыва связи в молекуле кислорода  $\Delta H = 142,3$  кДж/моль. Теплота реакции при образовании из трех молекул кислорода двух молекул озона 284,6 кДж/моль, то есть определена энтальпия реакции прямого направления. Эта реакция эндотермична – для синтеза озона из кислорода нужно подводить энергию (электрический разряд). Тепло выделяется не при синтезе, а при обратной реакции – распаде озона. Таким образом, энергия электрического

разряда тратится на эндотермический процесс синтеза озона, однако образовавшийся озон является метастабильным и стремится распасться обратно на кислород. Теплота этой реакции будет противоположенной теплоте синтеза то есть  $-142,3$  кДж/моль. Изменение энтальпии характеризует разницу в уровне энергии между двумя состояниями системы (озона),  $\Delta H < 0$ .

Скорость реакции синтеза озона  $v(x)$  (изменение концентрации озона) зависит от координаты  $x$ . Скорость реакции является сложной функцией от температуры, концентрации озона и параметров разряда (величины напряженности электрического поля). Скорость может быть выражена как произведение скорости газа на градиент концентрации озона вдоль разрядного промежутка.

Определим среднюю скорость реакции синтеза озона  $v(x)$  или количество озона, производимое в единице объема разрядной зоны за единицу времени, моль/(м<sup>3</sup>с)

$$v(x) = \frac{G}{V} \quad (2.7)$$

где  $G$  – производительность озона, моль/с;

$V$  – объем разрядной зоны, м<sup>3</sup>.

Или если скорость реакции выразить в г/(м<sup>3</sup>с)

$$v(x) = \frac{G \cdot M}{V} \quad (2.8)$$

где  $M$  – молярная масса, г/моль.

При этом теряется тепло через стенки канала по которому перемещается озоновооздушная смесь

$$P_3 = \lambda \cdot \Pi \cdot dx \cdot (T_1(x) - T_{CT}) \quad (2.9)$$

$\lambda$  – коэффициент теплопередачи стенок канала, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$\Pi$  – периметр канала по которому движется озоновооздушная смесь, м;

$T_1(x)$  – температура на входе в газоразрядный промежуток, К;

$T_{CT}$  – температура стенки канала, К.

Коэффициент теплопередачи может зависеть от скорости газа (режим течения ламинарный или турбулентный).

Составляем уравнение теплового баланса, для рассматриваемого элементарного объема  $dV=S \cdot dx$ ,

$$Q_{BX}(x) - Q_{ВЫХ}(x + dx) = P_1 + P_2 - P_3 \quad (2.10)$$

Подставляем выражения, получаем

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

Преобразуем, сокращая на  $dx$

$$\rho \cdot u \cdot S \cdot c_p \frac{dT}{dx} = P_p(x) \cdot S - \Delta H \cdot v(x) \cdot S - \lambda \cdot \Pi \cdot (T_1(x) - T_{CT}) \quad (2.12)$$

Приведем уравнение к виду

$$\frac{dT}{dx} + \alpha \cdot T(x) = \beta \quad (2.13)$$

где  $\alpha = \frac{\lambda \Pi}{\rho \cdot u \cdot S \cdot c_p}$  ;

$$\beta = \frac{P_p(x) - \Delta H \cdot v(x)}{\rho \cdot u \cdot c_p} + \alpha T_{CT}.$$

Полученное уравнение для температуры выхода озоновоздушной смеси является уравнением теплового баланса, которое связано с уравнением кинетики химической реакции.

Решим полученное дифференциальное уравнение первого порядка

Общее решение дифференциального уравнения

$$T(x) = e^{-\alpha x} \left( \int \beta \cdot e^{\alpha x} dx + C \right)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

$$T(x) = \frac{\beta}{\alpha} + C e^{-\alpha x}$$

Постоянная интегрирования определяется из начальных условий, то есть в соответствии с температурой на входе в газоразрядный промежуток  $T(0)=T_0$  При  $x=0$ , получаем

$$T(0) = T_0 = \frac{\beta}{\alpha} + C$$

Отсюда,

$$C = T_0 - \frac{\beta}{\alpha}$$

В результате, решением дифференциального уравнения

$$T(x) = \frac{\beta}{\alpha} + \left( T_0 - \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{-\alpha x} \quad (2.14)$$

Уравнение имеет экспоненциальный характер роста температуры от входной к установившейся величине температуры. Чем больше значение коэффициента  $\alpha$ , тем быстрее температура стремится к установившемуся значению температуры. Это значение определяется

$$T_{уст} = \frac{(P_p - \Delta H \cdot \nu(x)) S}{\lambda \Pi} + T_{СТ}$$

Отсюда, можно определить мощность на единицу объема газоразрядного промежутка с учетом того, что температура озона на выходе промежутка будет  $27^0\text{C}$ .

$$P_p = \frac{T_{уст} \cdot \lambda \cdot \Pi + \Delta H \cdot \nu(x) \cdot S - \lambda \cdot \Pi \cdot T_{СТ}}{S} \quad (2.15)$$

Получаем значение электрической мощности газоразрядного промежутка  $20 \text{ кВт/м}^3$ . При увеличении этой величины температура превысит температуру допустимую технологическим процессом. На рисунке 2.4. показано изменение температуры вдоль газоразрядного промежутка при указанной мощности электрического разряда на единицу объема разрядного промежутка (кривая 1), при увеличении мощности до  $25 \text{ кВт/м}^3$  (кривая 2) температура превысит допустимую.

Следует отметить, что температура зависит не только от мощности, но от многих других параметров, например линейной скорости прохождения газа (воздуха) в разрядном промежутке. На рисунке 2.4 показаны графики изменения температуры при скорости прохождения газа 0,3 м/с (кривая 2) и 0,5 м/с (кривая 1).

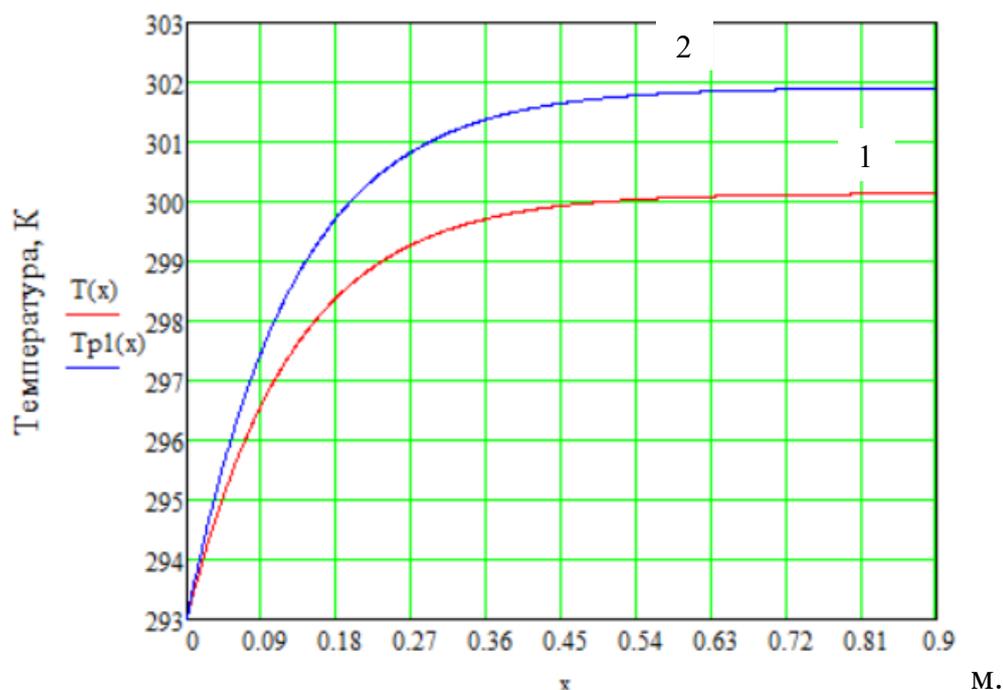


Рисунок 2.4. – Изменение температуры при увеличении мощности электрического разряда

### 2.3. Анализ изменения концентрации озона в газоразрядном промежутке.

Главной характеристикой озонатора является концентрация озона на его выходе. Поэтому важно проанализировать динамику изменения концентрации озона на по длине газоразрядного промежутка и установить влияющие, на этот процесс, параметры.

Рассмотрим этот же элементарный объем в газоразрядном промежутке с длиной  $dx$  и площадью поперечного сечения  $S$  (рисунок 2.1) Считаем процесс стационарным,

$$u \cdot \frac{dn}{dx} = v_{\text{синтеза}} - v_{\text{распада}} \quad (2.16)$$

где  $n$  – концентрация озона, моль/м<sup>3</sup> или г/м<sup>3</sup>;

$u$  – линейная скорость газа, м/с;

$v_{\text{синтеза}}$  – скорость синтеза озона;

$v_{\text{распада}}$  – скорость распада озона.

Скорость синтеза озона зависит от мощности электрического разряда и концентрации кислорода

$$v_{\text{синтеза}} = k_1(P_p) \cdot (n_{O_2}) \cdot \eta(T) \quad (2.17)$$

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 ( $m=1$ ).

$$k_1(P_p) = \alpha \cdot P_p \cdot e^{-\frac{\beta}{P_p}} \quad (2.18)$$

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

Скорость распада озона

$$v_{\text{распада}} = k_2(T) \cdot (n_{O_3})^q + k_3(T_e) n_{O_3} \cdot n_e \quad (2.19)$$

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

$$k_2(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} + B \cdot \frac{P_p}{1 + C \cdot P_p} \cdot e^{-\frac{\Delta}{T}} \quad (2.20)$$

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

В результате, получаем дифференциальное уравнение

$$u \cdot \frac{dn}{dx} = k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2}) \cdot \eta(T) - k_2(T) \cdot (n_{O_3}) - k_3(T_e) n_{O_3} \cdot n_e \quad (2.21)$$

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

$$u \cdot \frac{dn}{dx} = k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2}) - k_2(T) \cdot (n_{O_3}) \quad (2.22)$$

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

Решением данного уравнения является сумма установившейся и свободной составляющей функций изменения концентрации озона:

$$n_{O_3}(x) = n_{O_3V} + n_{O_3CB}$$

Установившаяся составляющая равна правой части исходного дифференциального уравнения

$$n_{O_3V} = \frac{k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2})}{k_2(T)}$$

Свободная составляющая

$$n_{O_3CB} = A e^{pt}$$

где  $A$  – постоянная интегрирования, которая определяется из начальных условий;

$p$  – корень характеристического уравнения;

Характеристическое уравнение

$$\frac{u}{k_2(T)} \cdot p + 1 = 0$$

$$p = -\frac{k_2(T)}{p}$$

Решением уравнения 2.22 является функция изменения концентрации озона вдоль разрядного промежутка

$$n(x) = \frac{k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2})}{k_2} \left( 1 - e^{-\frac{k_2}{u} x} \right) \quad (2.23)$$

График показан на рисунке 2.4. Если увеличивать концентрацию озона на выходе газоразрядного промежутка, за счет увеличения мощности электрического разряда, то температура по рисунку 2.2 превышает 30 °С, что является недопустимым значением для технологического процесса. Получаем, что в нашем случае мощность электрического разряда равна 20 кВт/м<sup>3</sup>. Эта величина соответствует требованиям технологического процесса.

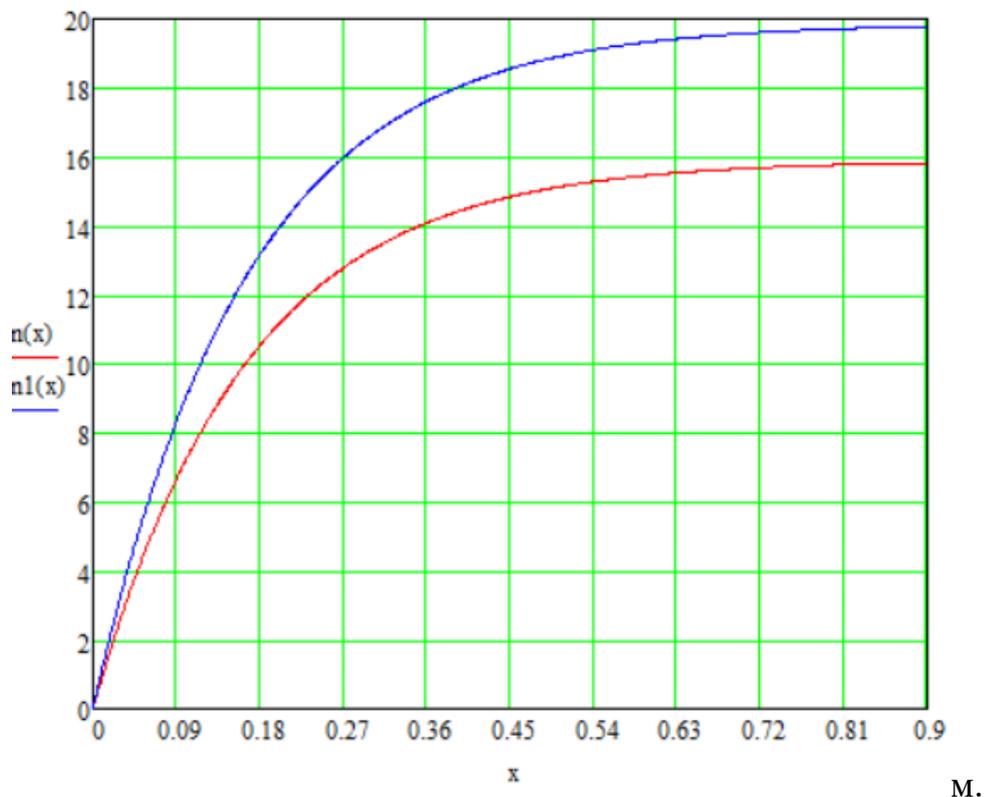


Рисунок 2.5 – Изменение концентрации в газоразрядном промежутке

Таким образом, в соответствии с разработанной схемой технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы получена система уравнений совмещающая термодинамические и электрические параметры и описывающая процессы, происходящие в газоразрядной ячейке озонатора.

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} + \alpha \cdot T(x) = \beta \\ u \cdot \frac{dn}{dx} = k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2}) - k_2(T) \cdot (n_{O_3}) \end{cases} \quad (2.24)$$

Решением полученной системы дифференциальных уравнений является

$$\begin{cases} T(x) = \frac{\beta}{\alpha} + \left( T_0 - \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{-\alpha x} \\ n(x) = \frac{k_1 \cdot P_P \cdot (n_{O_2})}{k_2} \left( 1 - e^{-\frac{k_2}{u} x} \right) \end{cases} \quad (2.25)$$

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

$$P_P = \frac{T_{ycm} \cdot \lambda \cdot \Pi + \Delta H \cdot v(x) \cdot S - \lambda \cdot \Pi \cdot T_{CT}}{S} \quad (2.26)$$

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

Для частного случая, представленного в этой работе, необходимая производительность озонатора 15 г/ч. Синтез озона происходит посредством барьерного разряда в газоразрядном промежутке, который позволяет получить необходимую концентрацию озона при заданных условиях по температуре озono - воздушной среды 28-30<sup>0</sup>С.

## 2.4. Мощность разряда.

Рассмотрим газоразрядный промежуток (рисунок 2.6), в котором осуществляется синтез озона.

Расчет удельной мощности или объемной мощности разряда производится по формуле

$$P_p = \frac{P_{CP}}{V} \quad (2.27)$$

где  $P_{CP}$  – средняя мощность разряда, кВт;

$V$  – объем разрядной зоны, м<sup>3</sup>.

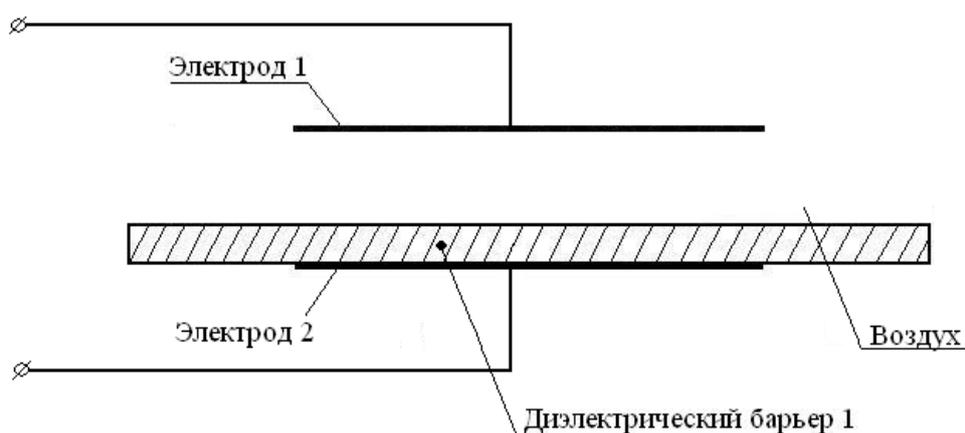


Рисунок 2.6 – Разрядный промежуток озонатора

Средняя мощность за один импульс (энергия импульса)

$$E_{имп} = U_{cp} I_{cp} \tau \quad (2.28)$$

где  $\tau$  – длительность импульса, с;

$U_{cp}$  и  $I_{cp}$  – средние значения напряжения и тока за время, равное длительности импульса (считаем импульс прямоугольной формы).

Средняя мощность разряда за длительный период времени

$$P_{CP} = E_{имп} \cdot f \quad (2.29)$$

где  $E_{имп}$  – энергия одного импульса, Дж;

$f$  – частота импульсов, Гц.

Скважность отношение длительности импульса к периоду следования импульсов

$$D = \frac{\tau}{T} = \tau \cdot f \quad (2.30)$$

С помощью данного параметра можно определить среднее значение мощность

$$P_{CP} = P_{max} \cdot D \quad (2.31)$$

где  $P_{max}$  – максимальная или пиковая мощность во время импульса.

Рассмотрим разрядный промежуток рисунок 2.5.

$$P_{max} = \frac{U^2}{Z_p} \quad (2.32)$$

или

$$P_{CP} = D \cdot \frac{U^2}{Z_p} \quad (2.33)$$

где  $Z_p$  – сопротивление разрядного промежутка.

Сопротивление разрядного промежутка имеет активно-емкостной характер с низким коэффициентом активной мощности. Емкость  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$  зависит от геометрических размеров и относительной диэлектрической проницаемости стекла (диэлектрического барьера).

Для барьерного разряда с плоскими электродами выбираем напряжение на разрядном промежутке  $U = 10$  кВ. Активное сопротивление газового разряда является величиной нелинейной и зависящей от режима горения разряда. Это параметр, характеризующий энергию в плазме идущую на нагрев, ионизацию и синтез озона. Выбранную мощность получаем при выборе частоты следования импульсов 500 Гц длительностью импульсов 57,6 мкс.

## **2.5 Аэродинамический расчёт системы подачи озонозодушной смеси в ёмкости с суспензией хлореллы с учётом местных пневматических сопротивлений**

При разработке биотехнологического комплекса культивирования хлореллы, в основе которого лежит метод электроозонной обработки суспензии, ключевым этапом проектирования является аэродинамическое обоснование тракта подачи газовой смеси. Инженерный расчёт позволяет не только определить оптимальные параметры сечения и протяженности магистралей, но и создать эффективную систему терморегуляции для разрядных камер, предотвращающую перегрев. Кроме того, в контуре обязательно предусматривается блок каталитического или термического разложения остаточного озона, что необходимо для соблюдения природоохранных норм и восстановления экологического баланса в рабочей зоне. Совокупность этих проектных решений напрямую влияет на итоговую смету и себестоимость изготовления опытного образца или промышленной установки. Таким образом, комплекс предварительных расчётов формирует базу для составления детализированного технического задания на конструирование узлов и агрегатов.

Для обоснования выбора нагнетательного оборудования и оптимизации параметров транспортировки озонсодержащего газа был проведен полный аэродинамический расчёт сети. Целью вычислений являлось определение суммарных потерь напора по длине воздуховода и в местных сопротивлениях (повороты, тройники, запорная арматура) при движении агрессивной озонозодушной смеси. На практике, например, при использовании генераторов озона типа ОГВ или ОПС-Р, критически важно учесть скорость потока: ее значение должно обеспечивать эффективное диспергирование и массообмен в колоннах с хлореллой, но при этом не создавать избыточного давления, приводящего к разрушению клеток. Полученные в ходе расчёта данные о потере давления (в Паскалях или миллибарах) являются

определяющими для корректного подбора компрессорного парка — будь то мембранные компрессоры Gast или более производительные винтовые агрегаты, способные поддерживать стабильную подачу рабочей среды на заданном режиме.

Для расчета рассматривалась схема электроозонной установки представленная на рис. 2.7. Согласно схемы потери давления будут определяться зависимостью

$$\Delta p = \sum \Delta p_l + \Delta p_{\text{эо}} + \sum \Delta p_m \quad (2.34)$$

где  $\Delta p$  – суммарные потери давления в системе подачи озонозовоздушной среды, Па;

$\sum \Delta p_l$  – суммарные потери давления по длине озонозовоздушной магистрали, Па;

$\Delta p_{\text{эо}}$ -аэродинамическое сопротивление разрядного устройства электроозонатора, Па;

$\sum \Delta p_m$ – суммарные потери давления на местных сопротивлениях, Па;

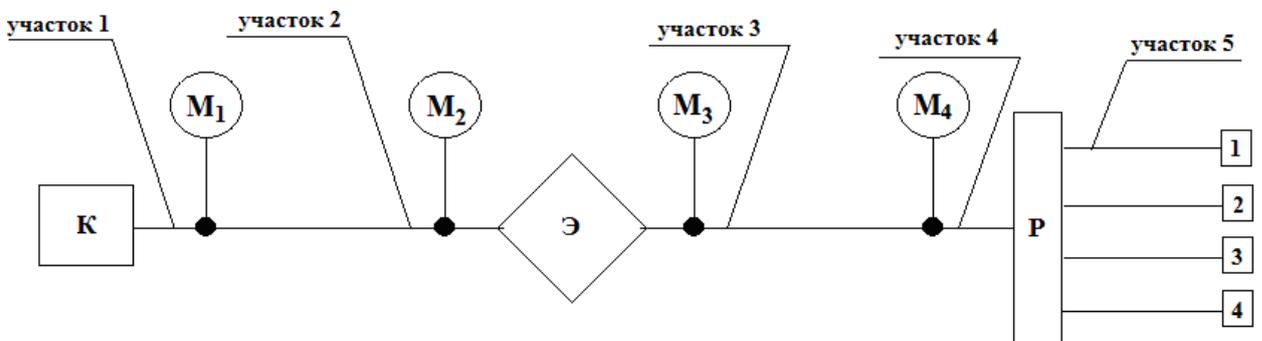


Рисунок 2.7– Схема электроозонной установки с расчётными участками

Потери давления по длине трубопровода на отдельном его участке определим с помощью формулы Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \rho \quad (2.35)$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, который определяется в зависимости от режима движения озонозовоздушной смеси.

$L$  – длина трубопровода, м;

$v$  – средняя скорость движения озонозоооздушной смеси, м/с;

$\rho$  – плотность озонозоооздушной среды при температуре 20 °С кг/м<sup>3</sup>;

Коэффициент гидравлического трения определяется в зависимости от режима движения озонозоооздушной смеси и значений чисел Рейнольдса (рис 2.8.) [24]

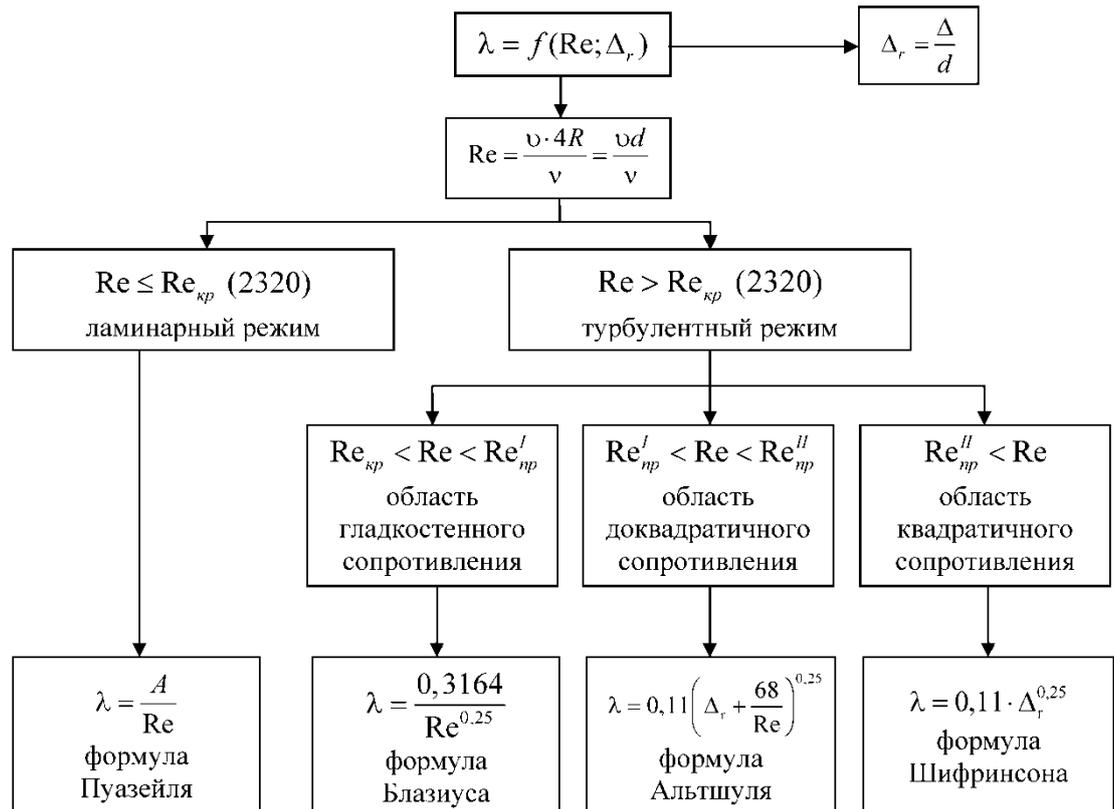


Рисунок 2.8-Блок-схема для выбора расчетной формулы коэффициента гидравлического трения

Для ламинарного потока вычисляется по выражению:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.36)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса.

Критерий Рейнольдса определяется зависимостью

$$\text{Re} = \frac{v_i \times d_i}{\nu}, \quad (2.37)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость озонозооушной смеси  $1,51 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, при температуре 20<sup>0</sup>С;

$v$  – средняя скорость потока озонозооушной смеси на расчётном участке магистрали, м/с;

$d$ –диаметр расчетного участка магистрали, м.

Скорость потока определяется из выражения

$$v = \frac{Q}{f}, \quad (2.38)$$

м/с

где  $Q$  – расход озонозооушной среды, м<sup>3</sup>/с (100 л/мин = 0,0016 м<sup>3</sup>/с),

$f$  – площадь поперечного сечения расчетного участка магистрали, м<sup>2</sup>;

Площадь сечения магистрали, для воздухопроводов круглого сечения определяется:

$$f = \frac{\pi \times d^2}{4}; \quad (2.39)$$

Если  $Re < Re_{кр} = 2320$ , то режим движения потока ламинарный. В случае  $Re > 2320$  – турбулентный.

Коэффициент сопротивления трения для турбулентного потока в переходной области сопротивления по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \times \left( \frac{\Delta_{\text{э}}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}, \quad (2.40)$$

где  $\Delta_{\text{э}}$  - эквивалентная абсолютная шероховатость, для фторопласта принимаем  $\Delta_{\text{э}} = 0,00015$  см.

Суммарные потери давления на местных сопротивлениях озонозооушной магистрали определяем по формуле Вейсбаха

$$\Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2} \rho \quad (2.41)$$

где  $\Sigma\xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений

Потери давления на аэродинамическое сопротивление разрядного устройства электроозонатора, можно принять в виде местного сопротивления

$$\Delta p_{\text{зо}} = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \rho, \quad (2.42)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления электроозонатора (в расчетах примем значение коэффициента  $\xi = 2,5$ ).

На рисунке 2.7 представлена структурная схема установки. Воздушная магистраль по всей своей длине имеет не одинаковое сечение, и содержит цилиндрические и конически сужающиеся участки(рисунок 2.9).

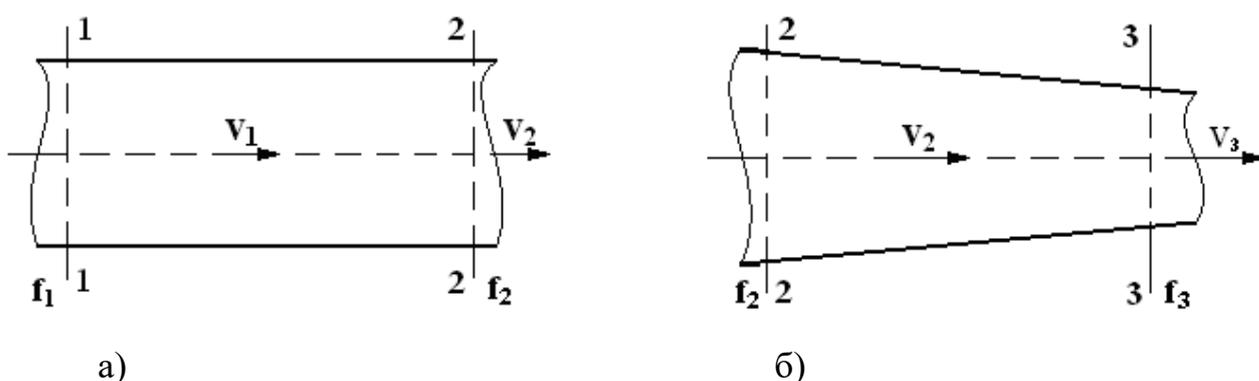


Рисунок 2.9 – Внешний вид нагнетающей линии: а) на отрезке от компрессора к генератору озона, б) отрезок от генератора озона к воздушной трубке диффузора (распылителя)

Длину основного воздуховода принимаем  $L = 500; 1000; 500$  мм. Тогда  $v_i$ – средняя скорость потока, определяем из уравнения:

Площадь сечения первого участка

$$f_1 = \frac{\pi \times d_1^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,01^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (2.43)$$

Площадь сечения второго участка

$$f_2 = \frac{\pi \times d_2^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,01^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (2.44)$$

Площадь сечения третьего участка

$$f_3 = \frac{\pi \times d_3^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,005^2}{4} = 1,96 \times 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (2.45)$$

Находим значения средних скоростей потоков на участках магистрали:

$$v_1 = \frac{Q}{f_1} = \frac{0,0016}{7,85 \cdot 10^{-5}} = 21,2 \quad (2.46)$$

, м/с

$$v_2 = \frac{Q}{f_2} = \frac{0,0016}{7,85 \cdot 10^{-5}} = 21,2 \quad (2.47)$$

, м/с

$$v_3 = \frac{Q}{f_3 \cdot n} = \frac{0,0016}{1,96 \cdot 10^{-5} \cdot 4} = 20,4 \quad (2.48)$$

, м/с

Подставляя найденные значения скоростей в (2.48) определим число Рейнольдса.

На первом участке

$$Re = \frac{v \times d}{\nu} = \frac{21,2 \times 0,01}{1,51 \times 10^{-5}} = 14039,7 \quad (2.49)$$

Следовательно режим потока озонозооозной смеси турбулентный, т.к число составляет  $Re = 14039,7$  и  $Re \leq 2320$

На втором участке  $Re = \frac{v \times d}{\nu} = \frac{21,2 \times 0,1}{1,51 \times 10^{-5}} = 14039,7$ ,

режим турбулентный:

На третьем участке:  $Re = \frac{v \times d}{\nu} = \frac{20,4 \times 0,005}{1,51 \times 10^{-5}} = 6754,9$ ,

режим турбулентный:

Рассчитаем относительную шероховатость  $\Delta_r$  и предельные числа Рейнольдса  $Re_{пр1}$  и  $Re_{пр2}$  для выбора расчетной формулы коэффициента  $\lambda$ .

Для участков 1 и 2 относительная шероховатость равна

$$\Delta_r = \frac{\Delta_r}{d} = \frac{0,00015}{1} = 0,00015 \quad (2.50)$$

см

Для участка 3 относительная шероховатость равна

$$\Delta_r = \frac{\Delta_r}{d} = \frac{0,00015}{0,5} = 0,0003 \text{ см}$$

Предельные числа Рейнольдса  $Re_{np1}$  и  $Re_{np2}$  для участков 1 и 2

$$Re_{np1} = \frac{10}{\Delta_r} = \frac{10}{0,00015} = 66667 \quad (2.51)$$

$$Re_{np2} = \frac{500}{\Delta_r} = \frac{500}{0,00015} = 3333333$$

Т.к. расчетное число Рейнольдса  $Re < Re_{np1}$  следовательно рассматриваем область гидравлически гладких труб и коэффициент  $\lambda$  для 1 –го и 2-го участков равен

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{0,316}{Re^{0,25}} = \frac{0,316}{14039,7^{0,25}} = 0,029 \quad (2.52)$$

Предельные числа Рейнольдса  $Re_{np1}$  и  $Re_{np2}$  для участка 3

$$Re_{np1} = \frac{10}{\Delta_r} = \frac{10}{0,0003} = 33333 \quad (2.53)$$

$$Re_{np2} = \frac{500}{\Delta_r} = \frac{500}{0,0003} = 1666667$$

Т.к. расчетное число Рейнольдса  $Re < Re_{np1}$  следовательно рассматриваем область гидравлически гладких труб и коэффициент  $\lambda$  для 3 –го участка равен

$$\lambda_3 = \frac{0,316}{Re^{0,25}} = \frac{0,316}{6754,9^{0,25}} = 0,035$$

Потери напора на первом участке равны

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \rho = 0,029 \frac{0,5}{0,01} \cdot \frac{21,2^2}{2} 1,293 = 421,3 \text{ Па} \quad (2.54)$$

Потери напора на втором участке:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \rho = 0,029 \frac{1}{0,01} \cdot \frac{21,2^2}{2} 1,293 = 842,6 \text{ Па} \quad (2.55)$$

Потери напора на третьем участке:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \rho = 0,035 \frac{0,5}{0,01} \cdot \frac{20,4^2}{2} 1,293 = 470,8 \text{ Па}$$

Суммарные потери давления на местных сопротивлениях озонозвоздушной магистрали равны

$$\begin{aligned} \Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2} \rho = (0,5 + 2,5 + 3,9) \frac{21,2^2}{2} 1,293 + \\ + 0,3 \frac{20,4^2}{2} 1,293 \cdot 4 = 2327,6 \end{aligned} \quad (2.56)$$

Суммарные потери давления по длине магистрали равны:

$$\begin{aligned} \Delta p = \sum \Delta p_l + \Delta p_{\text{зо}} + \sum \Delta p_m = \\ = 421,3 + 842,6 + 470,8 \cdot 4 + 2327,6 = 5474,7 \text{ Па} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Выбираем компрессор по заданной производительности  $Q = 100$  л/мин и вычисленному давлению  $\Delta p = 5474,7$  Па.

Выбираем поршневой компрессор Hailea Electrical Magnetic AC ACO-009D

## 2.6. Выводы

В результате проведённых теоретических и практических исследований сделаны следующие выводы:

1. Разработана схема технологического процесса электроозонной обработки суспензии хлореллы (рисунок 2.2).
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 озонозвоздушной смеси) и характеристики питающего сигнала электроозонатора. В частности при условии нагрева озонозвоздушной смеси не более 28-30<sup>0</sup>С и производительности электроозонатора 15 г/ч, к электродам необходимо подводить импульсное напряжение 10кВ, при частоте следования импульсов 500 Гц, длительность импульса 57,6 мкс.

3. В результате проведения аэродинамического расчёта системы подачи озонозвоздушной смеси в ёмкость с суспензией хлореллы определён потребный напор компрессора и осуществлен выбор компрессионного устройства.

4. Проведённые теоретические исследования не позволяют в полной мере определить влияние озона на суспензию хлореллы. Для этих целей необходимо проведение практического эксперимента.

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЯ НА КЛЕТКИ МИКРОВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛЫ**

#### **3.1 Методика экспериментальных исследований**

##### **3.1.1 Описание экспериментального оборудования**

Для проведения экспериментального исследования была спроектирована и собрана лабораторная установка, функционал которой обеспечивает генерацию озонозооной смеси с последующей подачей в культуральную среду, содержащую микроводоросль. Ключевое требование к оборудованию заключалось в возможности гибкой регулировки выходных параметров, а именно: температуры, избыточного давления на выходе и массовой концентрации озона в газовой фазе.

Конструктивно установка представляет собой совокупность нескольких модулей, объединенных в единую технологическую линию. Основным рабочим элементом служит герметичный корпус электроозонатора, внутри которого размещено разрядное устройство (как правило, используется система электродов «стержень-цилиндр» или барьерный разряд для повышения эффективности синтеза). Питание разрядной ячейки осуществляется от блока высокого напряжения, включающего повышающий трансформатор и полупроводниковый преобразователь частоты. Управление режимами работы возложено на задающий генератор с усилителем мощности, что позволяет точно выставлять параметры выходного сигнала. В состав установки также входят прозрачные емкости (колбы или биореакторы) с суспензией хлореллы, соединительные газовые магистрали из химически стойких материалов (например, фторопласта или силикона), а также система диффузоров для диспергирования газовой смеси в жидкости (Рис 2.1).

Алгоритм работы данной системы выглядит следующим образом. На первом этапе через блок управления подается напряжение питания на мембранный компрессор и на высокочастотный генератор. Последний

генерирует импульсы с заданной скважностью: в наших экспериментах частота следования составляла 500 Гц при длительности каждого импульса 57,6 микросекунды. Далее слабый сигнал поступает на усилитель мощности, который раскачивает первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Повышенное до нескольких киловольт напряжение прикладывается к электродам озонатора, инициируя тихий или барьерный электрический разряд в газовой промежутке. Именно в зоне разряда происходит диссоциация молекулярного кислорода и последующий синтез озона.

Одновременно с этим компрессор нагнетает атмосферный воздух, который предварительно очищается и осушается для увеличения выхода целевого продукта. Воздушный поток проходит через герметичный корпус озонатора, захватывая образовавшийся озон. Путем изменения напряжения на электродах или расхода воздуха через систему регулируется итоговая концентрация озона в смеси. Полученная озонозагрязненная смесь по гибким трубопроводам направляется к диффузорам, погруженным в суспензию хлореллы. Благодаря пористой структуре распылителей (керамических или из нержавеющей стали) смесь дробится на множество мелких пузырьков. Это критически важно, так как увеличение площади поверхности контакта фаз напрямую влияет на массообмен и, следовательно, на скорость и полноту реакции микроводоросли на окислительный стресс, индуцируемый озоном.

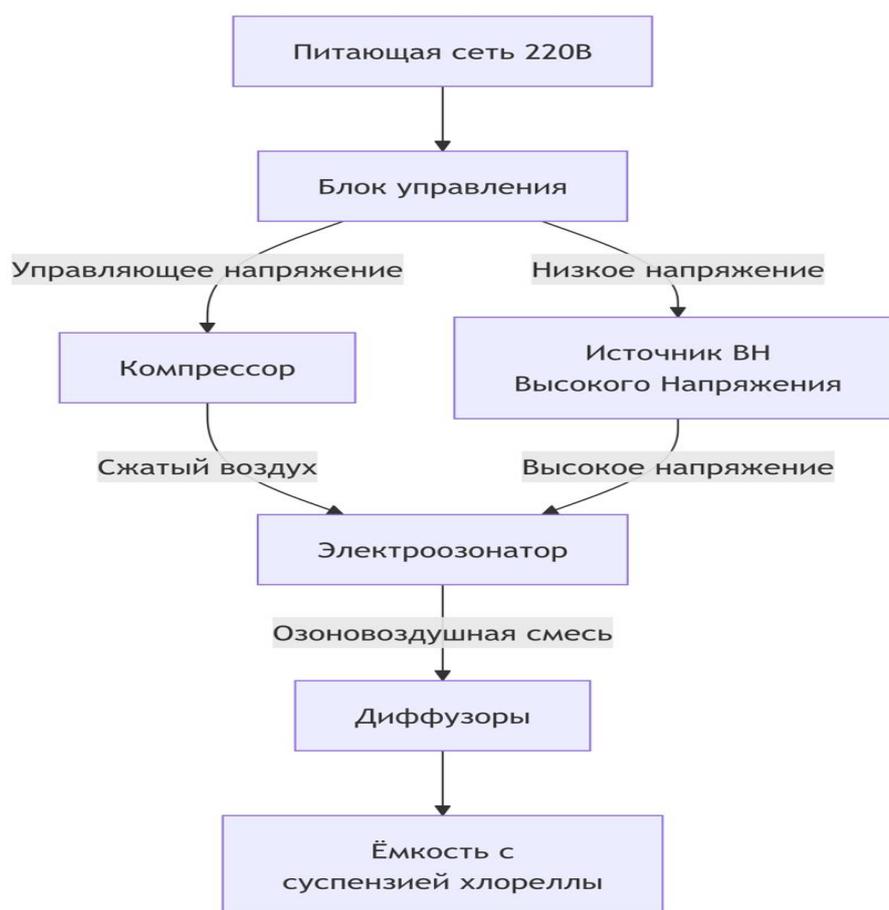


Рисунок 3.1 Структурная схема экспериментальной установки.

Особое внимание, в процессе общей экспериментальной работы уделялось нагреву озоно-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 озоно-воздушной смеси. Полученные данные представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Температура воздушной среды на выходе из разрядного устройства

| №  | $\tau$ , мин. | $t$ , °C | $t$ , °C |
|----|---------------|----------|----------|
| 1. | 0,0           | 22,0     | 22,0     |
| 2. | 1,0           | 25,2     | 23,7     |
| 3. | 2,0           | 27,8     | 24,8     |
| 4. | 3,0           | 29,7     | 26,3     |
| 5. | 4,0           | 30,3     | 27,6     |
| 6. | 5,0           | 31,2     | 27,9     |
| 7  | 6,0           | 31,5     | 28,6     |
| 8  | 7,0           | 32,2     | 28,8     |
| 9  | 8,0           | 32,5     | 29,4     |
| 10 | 9,0           | 33,0     | 29,5     |

Графически результаты эксперимента представили на рис. 3.1

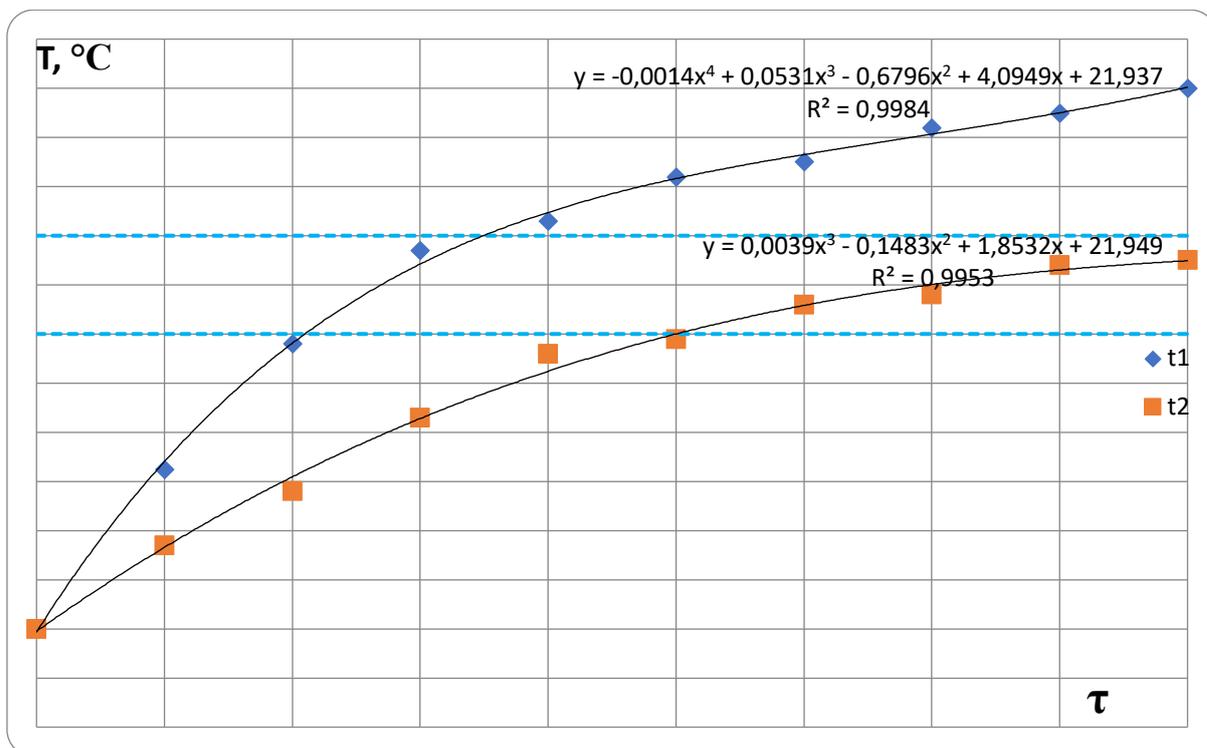


Рис. 3.1 Нагрев озono-воздушной смеси на выходе из герметичного разрядного устройства. Где t1- нагрев при питании синусоидальным сигналом; t2- нагрев при импульсном питании.

Таким образом, полученные данные указывают, что при работе герметичного разрядного устройства на синусоидальном «классическом» напряжении нагрев озono-воздушной смеси с начальной температурой 22 °С до 30 °С 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 °С, 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.

Регулирование производительности экспериментальной установки осуществляется изменением питающего напряжения разрядного промежутка. Установку откалибровали под необходимые концентрации озonoвоздушной

смеси. Измерения концентрации озона производилось йодометрическим методом.

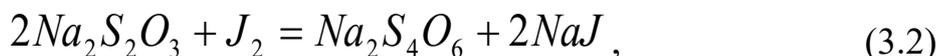
### 3.1.2 Методика измерение концентрации озона

В качестве основного метода проведения измерений концентрации нами был выбран йодометрический метод, как наиболее точный. Данный метод используется для измерения концентрации озона в воздухе при содержании от 4% до 10<sup>-6</sup>%. Йодометрический метод рекомендуется для поверки электронных газоанализаторов, предназначенных для измерения содержания озона в воздухе [68]. Широкое использование данного метода объясняется простотой проведения анализа воздушной среды.

Сущность йодометрического метода измерения концентрации озона в газе заключается в следующем. Озоновоздушная смесь, пропускается через раствор йодистого калия и серной кислоты до появления светло-жёлтой окраски. В результате химического взаимодействия озона с йодистым калием выделяется эквивалентное количество свободного йода по уравнению:



Проозонированный раствор рекомендуется выдержать перед титрованием в тёмном месте ~ 10 минут. Выделившийся в ходе этой реакции йод оттитровывается серноватистокислым натрием (тиосульфатом натрия) по уравнению:



Титрование производится в присутствии индикатора – крахмала и ведётся до обесцвечивания раствора, то есть до полного связывания свободного йода.

На каждую молекулу вступающего в реакцию озона при титровании расходуется две молекулы тиосульфата. Таким образом, количество тиосульфата, пошедшее на титрование, пропорционально количеству озона,

вступающего в реакцию, и, если реакция прошла полностью, то по количеству тиосульфата можно определить концентрацию озона  $[O_3]$  в газе по формуле:

$$[O_3]_{(об\%)} = 100 \cdot \frac{22,41 \cdot p_0 \cdot \nu \cdot T \cdot N}{2 \cdot p \cdot T_0 \cdot 1000 \cdot V} \cong 1,12 \frac{\nu \cdot N}{\omega \cdot \tau}, \quad (3.3)$$

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 озоновоздушной смеси (в литрах), пропущенной через раствор;  $\omega$  – объёмная скорость потока газа;  $\tau$  – время прокачки. Коэффициент 2 в знаменателе показывает, что при нейтрализации одной молекулы йода расходуется две молекулы тиосульфата.

Определение концентрации озона в газе производилось в следующей последовательности. Заранее в мерной колбе готовился 0,1n водный раствор йодистого калия: 1,66 г йодида калия KJ растворили в 100 мл дистиллированной воды  $H_2O$ . Аналогично в мерной колбе приготовили 0,01n раствор пятиводного тиосульфата: в 100 мл дистиллята растворили 1,24 г серноватистокислового натрия. С помощью воронки раствор тиосульфата перелили в бюретку объёмом 50 мл, закреплённую на штативе. Водный раствор йодида калия KJ барботировали 10-ю литрами озоновоздушной смеси, произведённой экспериментальной установкой. Проозонированный раствор выдерживали в тёмном месте в течение 8 – 10 минут, после чего раствор подкисляли 5 мл разбавленной (1:5) серной кислоты и ставили под бюретку. Бюретку с помощью крана настроили в режим по каплям. Выделившийся йод оттитровывали 0,01n раствором тиосульфата и периодически перемешивали до появления светло-жёлтой окраски, после чего добавляли 1 мл 1%-ного раствора крахмала, и жидкость дотитровывали до исчезновения синей окраски. Отсчитывали по шкале бюретки количество миллилитров пошедших на титрование. Далее по барометру и термометру произвели замеры атмосферного давления и температуры окружающего

воздуха. Концентрацию озона вычисляли по формуле (3.3), с учётом соотношения единиц измерения:  $1\% = 10000 \text{ ppm}$  и  $1000 \text{ мг/м}^3 = 466,4 \text{ ppm}$ .

В связи с тем, что йодид калия является светочувствительным веществом и может разлагаться при попадании на него солнечного света, проводили эксперимент в затемненном помещении. При небольших количествах озона (менее  $10 \text{ мг/м}^3$ ) выгодно пропустить через раствор йодида калия как можно больше газовой смеси.

### **3.1.3 Методика проведения лабораторных исследований**

В лабораторных условиях определяли концентрацию клеток и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы. Стандартная методика предусматривает, что в лаборатории концентрацию клеток и оптическую плотность раствора суспензии хлореллы измеряют фотоэлектрическим калориметром КФК-2 на 4 сутки после высева «молодых» клеток [80, 115]. Высев клеток хлореллы осуществляется путём введения маточной культуры в новую жидкую питательную среду, при этом маточная культура должна составлять 20% от объёма этой среды. Концентрация (находиться по калибровочному графику) вносимого посевного материала должна составлять 3 млн. кл./мл, а оптическая плотность от 0,8 до 1,4. Размеры «молодых» клеток должны варьироваться в пределах от 1,5 до 2,0 мкм. Готовым к использованию является раствор суспензии хлореллы, достигший концентрации клеток в 60 млн. кл./мл и оптическая плотность которого должна составлять 1,4 – 1,8. При этом клетки должны иметь в диаметре 6-9 мкм.

Нами в качестве точного метода определения концентрации клеток хлореллы в заданном объёме питательной среды предлагается использование двухсеточной камеры Горяева и электронного микроскопа. При работе с камерой можно визуально рассмотреть влияние озона на рост и развитие

клеток хлореллы и ускорить получение результатов экспериментальных исследований.

Лабораторные исследования производились в следующей последовательности. Суспензию хлореллы с «молодыми» клетками сливали в пять заранее заготовленных маркированных колб, объёмом 1000 мл каждая. Измеряли температуру раствора до обработки. Четыре ёмкости обрабатывали озоновоздушной смесью с заданной концентрацией озона и временем обработки. Пятую колбу с суспензией оставляли в качестве контрольной (без обработки). Измеряли температуру раствора в каждой ёмкости после озоновоздушной обработки. После чего и обработанные и контрольную ёмкости оставляли при дневном освещении и комнатной температуре на сутки.

Через сутки проводили анализ каждого раствора суспензии. С помощью дозатора на каждую секцию камеры Горяева наносили по капле анализируемого раствора и притирали покровным стеклом, следя за отсутствием пузырей под стеклом. Затем камеру помещали под объектив восьмикратного увеличения (объектив \*8, окуляр \*10) электронного микроскопа, заранее прогретого. Производили настройку микроскопа до момента чёткой видимости нанесённой сетки с квадратами и клетками хлореллы. Мысленно разбили сетку на пять зон, в каждой из которых выделили по одному большому квадрату. После этого, пользуясь правилом подсчёта форменных элементов в камере Горяева (правило Егорова), произвели подсчёт количества клеток хлореллы в больших квадратах сетки камеры. Зная объём занимаемый суспензией хлореллы под одним большим квадратом ( $0,004 \text{ мм}^3(\text{мкл})$ ), число квадратов в камере (225 шт.), среднее арифметическое количество подсчитанных клеток под одним квадратом и объём всей камеры Горяева ( $0,9 \text{ мм}^3(\text{мкл})$ ) определили концентрацию клеток неразбавленной суспензии в одном миллилитре раствора из соотношения:

$$C_{ХЛ} = \frac{1}{0,004 \cdot 10^{-3}} \cdot N_{КЛ} = N_{КЛ} \cdot 2,5 \cdot 10^5, \quad (3.4)$$

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

Анализ содержимого каждой колбы проводили с четырёхкратным повтором. После проведения каждого подсчёта клеток камеру промывали дистиллированной водой, протирали мягкой салфеткой и высушивали. По окончании работы с камерой Горяева её дезинфицировали, погружая на 30 минут в 70 %раствор этилового спирта, промывали дистиллированной водой и протирали салфеткой.

### **3.1.4 Исследование влияния озона на рост и развитие клеток хлореллы**

В лабораториях РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева и на производственном объекте ИП Трифонов А.В. был поставлен эксперимент по выявлению влияния озоновоздушной смеси, при различных значениях концентрации и экспозиции, на рост и развитие клеток хлореллы. Первоначально был проведен поисковый эксперимент по нахождению области эффективной концентрации озона. Для проведения этого эксперимента было обработано озоновоздушной смесью три ёмкости с суспензией хлореллы объёмом 1000 мл каждая, клетки которой прошли активное деление и «омолодились», со следующими значениями концентрации озона: 9,34 мг/м<sup>3</sup>; 17,79 мг/м<sup>3</sup>; 40,04 мг/м<sup>3</sup>. Обработку каждой ёмкости проводили в течение 10 минут. Четвёртую ёмкость оставили без обработки в качестве контрольной. Результаты эксперимента были сведены в таблицу:

Таблица 3.2 – Результаты поискового эксперимента по нахождению эффективной концентрации озона.

| Номер опыта | Концентрация озона $[O_3]$ , $мг/м^3$ | Время обработки $\tau$ , мин | Объём обработанной суспензии хлореллы $V$ , мл | Количество клеток под квадратом камеры $N$ , шт. |    |    |    |    | Среднее число клеток под квадратом $N_{ср}$ , шт. | Концентрация клеток хлореллы $C_{ХЛ}$ , кл/мл |
|-------------|---------------------------------------|------------------------------|--|--|----|----|----|----|---|---|
|             |                                       |                              |  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |   |   |
| 1           | 9,34                                  | 10                           | 1000   | 55   | 49 | 53 | 58 | 61 | 55  | $13,75 \cdot 10^6$                            |
| 2           | 17,79                                 |                              |  | 43   | 55 | 34 | 39 | 57 | 46  | $11,5 \cdot 10^6$                             |
| 3           | 40,04                                 |                              |  | 47   | 40 | 37 | 34 | 52 | 42  | $10,5 \cdot 10^6$                             |
| Контроль    | -                                     |                              |  | 59   | 48 | 63 | 36 | 56 | 52  | $13,0 \cdot 10^6$                             |

Проанализировав данные опыта, пришли к выводу, что для нахождения оптимальной области положительного влияния озона на клетки хлореллы необходимо подробно рассмотреть влияние озоновооздушной смеси с концентрациями озона в пределах до 12 – 13  $мг/м^3$ , при неизменном времени обработки.

Для продолжения поиска оптимальной области положительного влияния озона нами были выбраны для обработки следующие уровни концентрации озона: 3,0  $мг/м^3$ ; 5,0  $мг/м^3$ ; 7,0  $мг/м^3$ ; 9,0  $мг/м^3$ ; 11,0  $мг/м^3$ ; 13,0  $мг/м^3$ . Результаты эксперимента были отображены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты поискового эксперимента по нахождению эффективной концентрации озона.

| Номер опыта | Концентрация озона $[O_3]$ , $мг/м^3$ | Время обработки $\tau$ , мин | Количество клеток под квадратом камеры $N$ , шт. |    |    |    |    | Среднее число клеток под квадратом $N_{ср}$ , шт. | Концентрация клеток хлореллы $C_{ХЛ}$ , кл/мл |
|-------------|---------------------------------------|------------------------------|--|----|----|----|----|---|---|
|             |                                       |                              | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |   |   |
| 1           | 3,0                                   | 10                           | 62   | 61 | 78 | 67 | 60 | 65  | $16,15 \cdot 10^6$                            |
| 2           | 5,0                                   |                              | 81   | 72 | 62 | 71 | 63 | 70  | $17,05 \cdot 10^6$                            |
| 3           | 7,0                                   |                              | 88   | 86 | 78 | 88 | 77 | 83  | $20,6 \cdot 10^6$                             |
| 4           | 9,0                                   |                              | 78   | 75 | 73 | 70 | 60 | 71  | $18,1 \cdot 10^6$                             |
| 5           | 11,0                                  |                              | 54   | 51 | 65 | 67 | 53 | 58  | $14,55 \cdot 10^6$                            |
| 6           | 13,0                                  |                              | 50   | 53 | 55 | 74 | 49 | 56  | $14,05 \cdot 10^6$                            |
| Контроль    | -                                     | -                            | 70   | 51 | 62 | 41 | 60 | 57  | $14,1 \cdot 10^6$                             |

По результатам эксперимента была также построена зависимость концентрации клеток хлореллы в суспензии от концентрации озона подаваемого в ёмкость.

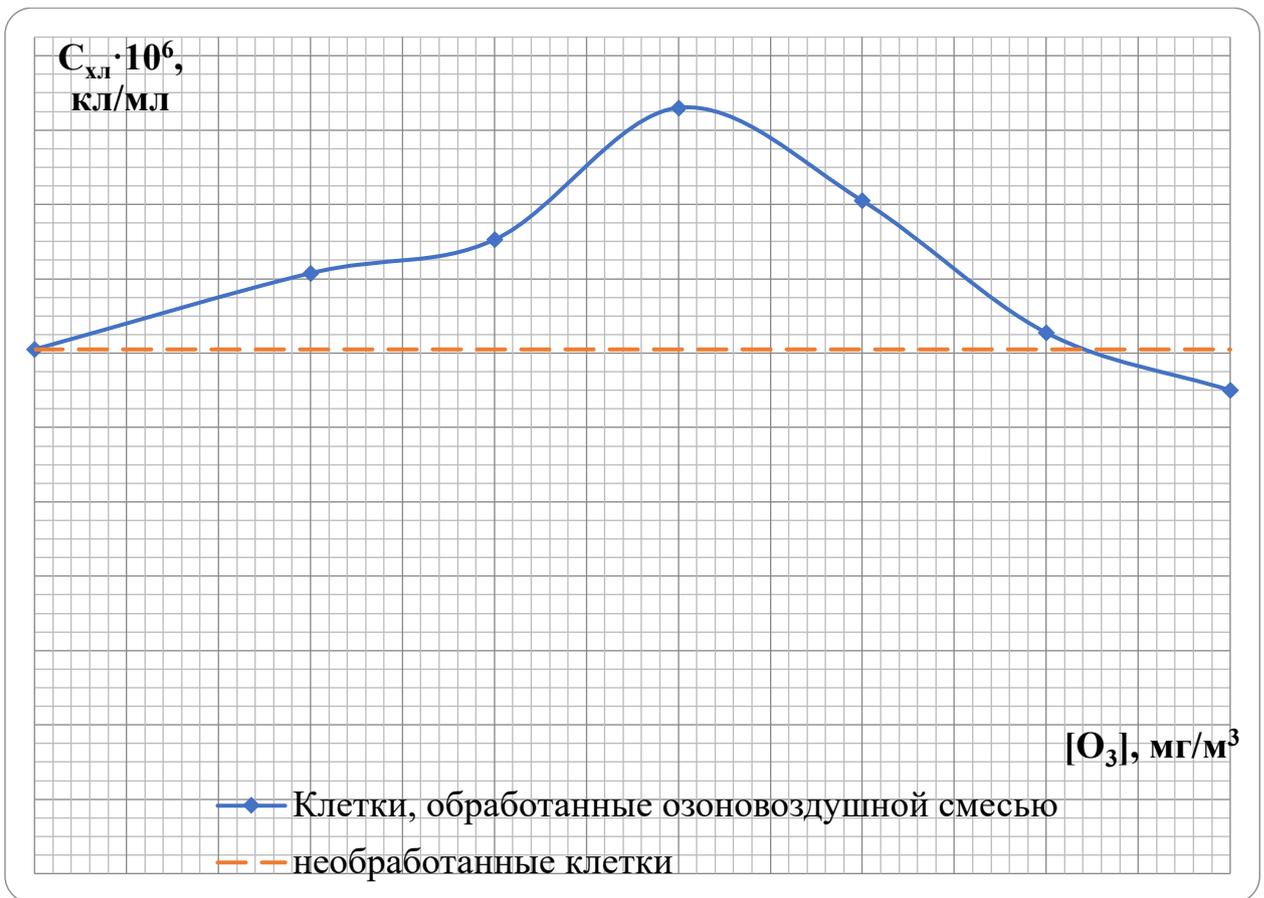


Рисунок 3.2 – Данные поискового эксперимента по нахождению эффективной концентрации озона.

При анализе полученных данных пришли к выводу, что оптимальная область положительного влияния озона на клетки хлореллы лежит в пределах от 3,0 мг/м<sup>3</sup> до 9,0 мг/м<sup>3</sup>.

Для определения эффективного времени воздействия озона на клетки хлореллы при концентрации 7,0 мг/м<sup>3</sup> был проведён эксперимент со следующими уровнями времени: 2 мин, 4 мин, 6 мин, 8 мин, 10 мин, 12 мин, 14 мин. В таблице 3.4 содержатся результаты этого опыта.

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента по нахождению эффективного времени воздействия озона на клетки хлореллы.

| Номер опыта | Концентрация озона $[O_3]$ , $мг/м^3$ | Время обработки $\tau$ , мин | Количество клеток под квадратом камеры $N$ , шт. |    |    |    |     | Среднее число клеток под квадратом $N_{ср}$ , шт. | Концентрация клеток хлореллы $C_{ХЛ}$ , кл/мл |
|-------------|---------------------------------------|------------------------------|--|----|----|----|-----|---|---|
|             |                                       |                              | 1  | 2  | 3  | 4  | 5   |   |   |
| 1           | 7,0                                   | 2                            | 77   | 74 | 83 | 72 | 64  | 74  | $18,55 \cdot 10^6$                            |
| 2           |                                       | 4                            | 88   | 86 | 82 | 80 | 87  | 85  | $21,2 \cdot 10^6$                             |
| 3           |                                       | 6                            | 97   | 94 | 83 | 90 | 100 | 93  | $23,45 \cdot 10^6$                            |
| 4           |                                       | 8                            | 82   | 84 | 89 | 87 | 92  | 87  | $21,8 \cdot 10^6$                             |
| 5           |                                       | 10                           | 86   | 84 | 67 | 94 | 73  | 81  | $20,2 \cdot 10^6$                             |
| 6           |                                       | 12                           | 80   | 67 | 77 | 71 | 75  | 74  | $18,45 \cdot 10^6$                            |
| 7           |                                       | 14                           | 65   | 56 | 71 | 47 | 35  | 55  | $13,9 \cdot 10^6$                             |
| Контроль    | -                                     | -                            | 70   | 51 | 62 | 41 | 60  | 57  | $14,1 \cdot 10^6$                             |

По результатам эксперимента была также построена зависимость концентрации клеток хлореллы в суспензии от времени обработки озоновоздушной смесью и представлены фотографии камеры Горяева с контрольными обработанными образцами, сделанные цифровой камерой Microscope Digital Camera Levenhuk C-Series для микроскопа и обработанные программой Таур View.

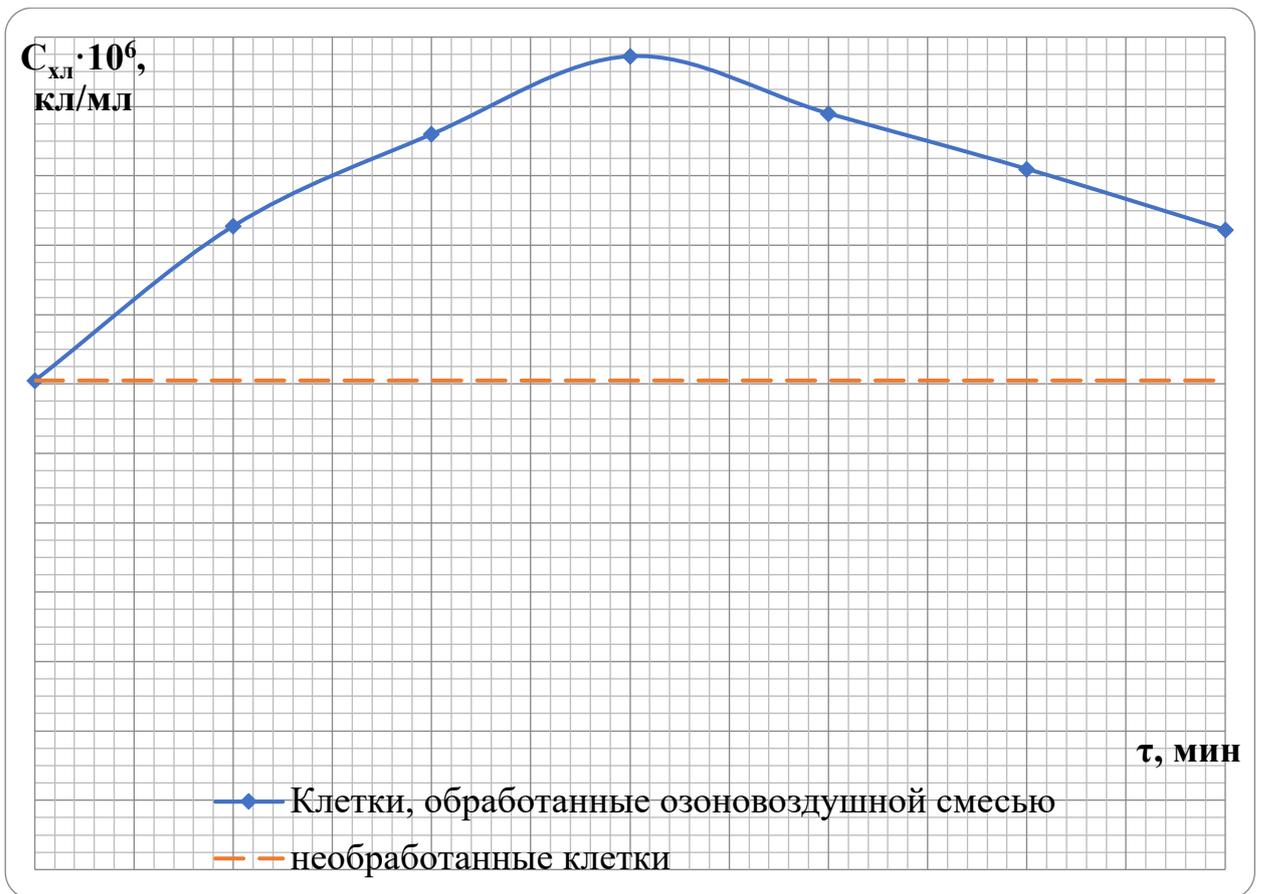


Рисунок 3.3 – Зависимость концентрации клеток хлореллы в суспензии от времени обработки озоновоздушной смесью.

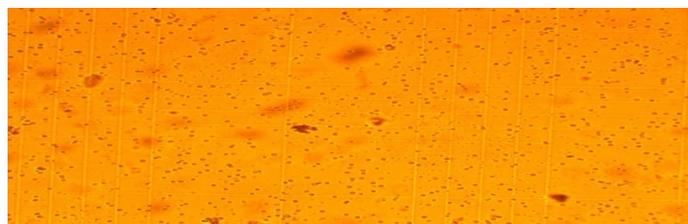


Рисунок 3.4 – Фотография контрольного образца суспензии хлореллы.

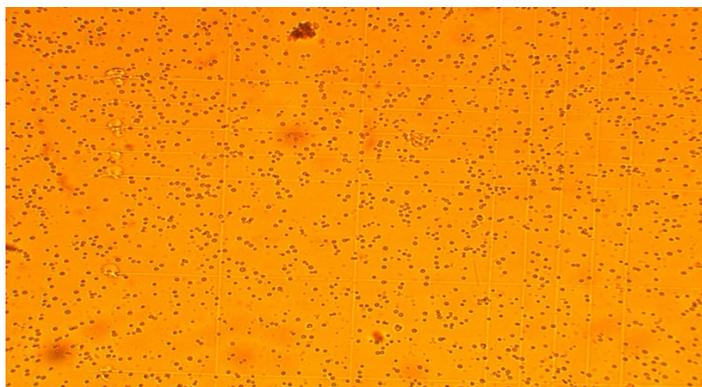


Рисунок 3.5 – Фотография суспензии хлореллы прошедшей электроозонную обработку с концентрацией озона – 7,0 мг/м<sup>3</sup> при времени – 6 минут.

Как видно из представленной зависимости область эффективного воздействия озона на клетки хлореллы находится в пределах 4 – 10 минут.

Для более точного определения эффекта влияния озона на клетки микроводоросли хлореллы был заложен полнофакторный эксперимент. При проведении этого эксперимента использовались методы математической статистики, в качестве независимых переменных приняты:

$x_1$  –  $\tau$  – времени обработки клеток суспензии хлореллы озоновоздушной смесью (4 уровня: 4; 6; 8; 10 минут). Значения уровней были приняты в области экстремумов полученной в однофакторном поисковом эксперименте.

$x_2$  –  $[O_3]$  –  $C_{O_3}$  концентрация озона в озоновоздушной смеси подаваемой в ёмкость с суспензией хлореллы (4 уровня: 3,0; 5,0; 7,0; 9,0 мг/м<sup>3</sup>). Значения уровней были приняты в области экстремумов полученной в однофакторном поисковом эксперименте.

$x_3$  –  $M$  – периодичность обработки клеток суспензии хлореллы озоновоздушной смесью (4 уровня: 1; 2; 3; 4 раза в четыре дня). Значения уровней были приняты с учётом биологических циклов питания и деления клеток, а также специфики культивирования микроводоросли хлореллы.

В качестве зависимых переменных в лабораторных исследованиях были приняты:

$y_1$  –  $C_{хл}$  – концентрация клеток хлореллы в одном миллилитре неразбавленной суспензии, кл/мл.

$y_2$  –  $D_{хл}$  оптическая плотность раствора суспензии.

Для проведения эксперимента была составлена матрица планирования эксперимента, представленная таблицей 3.5.

Таблица 3.5 - Матрица планирования эксперимента

| № опыта | Время обработки, мин.<br>(τ) | Концентрация озона, мг/м <sup>3</sup><br>(C <sub>оз</sub> ) | Количество обработок в 4 дня,<br>(Т) | Средняя концентрация клеток хлореллы, кл/мл<br>(C <sub>хл</sub> ) | Средняя оптическая плотность суспензии<br>(D <sub>хл</sub> ) |
|---------|------------------------------|---|--------------------------------------|---|--|
| 1       | 2                            | 3   | 4                                    | 5   | 6  |
| 1       | 0                            | 0   | 0                                    | 14,1·10 <sup>6</sup>  | 0,85   |
| 2       | 0                            | 0   | 0                                    | 14,1·10 <sup>6</sup>  | 0,85   |
| 3       | 0                            | 0   | 0                                    | 14,1·10 <sup>6</sup>  | 0,85   |
| 4       | 0                            | 0   | 0                                    | 14,1·10 <sup>6</sup>  | 0,85   |
| 5       | 4                            | 3,0   | 1                                    | 17,35·10 <sup>6</sup>   | 1,04   |
| 6       | 4                            | 3,0   | 2                                    | 18,05·10 <sup>6</sup>   | 1,08   |
| 7       | 4                            | 3,0   | 3                                    | 16,15·10 <sup>6</sup>   | 0,97   |
| 8       | 4                            | 3,0   | 4                                    | 15,95·10 <sup>6</sup>   | 0,95   |
| 9       | 4                            | 5,0   | 1                                    | 18,05·10 <sup>6</sup>   | 1,11   |
| 10      | 4                            | 5,0   | 2                                    | 18,85·10 <sup>6</sup>   | 1,15   |
| 11      | 4                            | 5,0   | 3                                    | 17,05·10 <sup>6</sup>   | 1,05   |
| 12      | 4                            | 5,0   | 4                                    | 16,35·10 <sup>6</sup>   | 1,0  |
| 13      | 4                            | 7,0   | 1                                    | 20,85·10 <sup>6</sup>   | 1,25   |
| 14      | 4                            | 7,0   | 2                                    | 21,05·10 <sup>6</sup>   | 1,28   |
| 14      | 4                            | 7,0   | 3                                    | 20,6·10 <sup>6</sup>  | 1,22   |
| 16      | 4                            | 7,0   | 4                                    | 19,9·10 <sup>6</sup>  | 1,1  |
| 17      | 4                            | 9,0   | 1                                    | 18,98·10 <sup>6</sup>   | 1,13   |
| 18      | 4                            | 9,0   | 2                                    | 19,30·10 <sup>6</sup>   | 1,16   |
| 19      | 4                            | 9,0   | 3                                    | 18,10·10 <sup>6</sup>   | 1,09   |
| 20      | 4                            | 9,0   | 4                                    | 17,47·10 <sup>6</sup>   | 1,03   |
| 21      | 6                            | 3,0   | 1                                    | 19,88·10 <sup>6</sup>   | 1,1  |
| 22      | 6                            | 3,0   | 2                                    | 20,45·10 <sup>6</sup>   | 1,21   |

|           |          |            |          |                                      |             |
|-----------|----------|------------|----------|--------------------------------------|-------------|
| 23        | 6        | 3,0        | 3        | $19,22 \cdot 10^6$                   | 1,12        |
| 24        | 6        | 3,0        | 4        | $18,43 \cdot 10^6$                   | 1,09        |
| 25        | 6        | 5,0        | 1        | $20,98 \cdot 10^6$                   | 1,22        |
| 26        | 6        | 5,0        | 2        | $22,23 \cdot 10^6$                   | 1,32        |
| 27        | 6        | 5,0        | 3        | $20,4 \cdot 10^6$                    | 1,22        |
| 28        | 6        | 5,0        | 4        | $20,24 \cdot 10^6$                   | 1,21        |
| 29        | 6        | 7,0        | 1        | $23,74 \cdot 10^6$                   | 1,42        |
| <b>30</b> | <b>6</b> | <b>7,0</b> | <b>2</b> | <b><math>24,47 \cdot 10^6</math></b> | <b>1,45</b> |
| 31        | 6        | 7,0        | 3        | $22,46 \cdot 10^6$                   | 1,32        |
| 32        | 6        | 7,0        | 4        | $20,72 \cdot 10^6$                   | 1,24        |
| 33        | 6        | 9,0        | 1        | $21,23 \cdot 10^6$                   | 1,25        |
| 34        | 6        | 9,0        | 2        | $21,74 \cdot 10^6$                   | 1,30        |
| 35        | 6        | 9,0        | 3        | $19,3 \cdot 10^6$                    | 1,07        |
| 36        | 6        | 9,0        | 4        | $17,05 \cdot 10^6$                   | 1,01        |
| 37        | 8        | 3,0        | 1        | $18,23 \cdot 10^6$                   | 1,03        |
| 38        | 8        | 3,0        | 2        | $18,74 \cdot 10^6$                   | 1,12        |
| 39        | 8        | 3,0        | 3        | $17,3 \cdot 10^6$                    | 1,04        |
| 40        | 8        | 3,0        | 4        | $16,74 \cdot 10^6$                   | 0,98        |
| 41        | 8        | 5,0        | 1        | $19,24 \cdot 10^6$                   | 1,15        |
| 42        | 8        | 5,0        | 2        | $19,74 \cdot 10^6$                   | 1,1         |
| 43        | 8        | 5,0        | 3        | $18,47 \cdot 10^6$                   | 0,99        |
| 44        | 8        | 5,0        | 4        | $16,74 \cdot 10^6$                   | 0,94        |
| 45        | 8        | 7,0        | 1        | $21,08 \cdot 10^6$                   | 1,2         |
| 46        | 8        | 7,0        | 2        | $22,4 \cdot 10^6$                    | 1,34        |
| 47        | 8        | 7,0        | 3        | $20,24 \cdot 10^6$                   | 1,21        |
| 48        | 8        | 7,0        | 4        | $17,47 \cdot 10^6$                   | 1,03        |
| 49        | 8        | 9,0        | 1        | $19,47 \cdot 10^6$                   | 1,15        |
| 50        | 8        | 9,0        | 2        | $19,98 \cdot 10^6$                   | 1,18        |
| 51        | 8        | 9,0        | 3        | $18,26 \cdot 10^6$                   | 1,15        |

|    |    |     |   |                    |      |
|----|----|-----|---|--------------------|------|
| 52 | 8  | 9,0 | 4 | $17,05 \cdot 10^6$ | 1,03 |
| 53 | 10 | 3,0 | 1 | $16,73 \cdot 10^6$ | 0,99 |
| 54 | 10 | 3,0 | 2 | $18,04 \cdot 10^6$ | 1,09 |
| 55 | 10 | 3,0 | 3 | $16,57 \cdot 10^6$ | 1,07 |
| 56 | 10 | 3,0 | 4 | $16,05 \cdot 10^6$ | 0,97 |
| 57 | 10 | 5,0 | 1 | $17,73 \cdot 10^6$ | 1,04 |
| 58 | 10 | 5,0 | 2 | $18,45 \cdot 10^6$ | 0,99 |
| 59 | 10 | 5,0 | 3 | $16,47 \cdot 10^6$ | 0,98 |
| 60 | 10 | 5,0 | 4 | $15,73 \cdot 10^6$ | 0,94 |
| 61 | 10 | 7,0 | 1 | $20,4 \cdot 10^6$  | 1,28 |
| 62 | 10 | 7,0 | 2 | $21,24 \cdot 10^6$ | 1,27 |
| 63 | 10 | 7,0 | 3 | $19,4 \cdot 10^6$  | 1,1  |
| 64 | 10 | 7,0 | 4 | $18,24 \cdot 10^6$ | 1,07 |
| 65 | 10 | 9,0 | 1 | $17,98 \cdot 10^6$ | 1,03 |
| 66 | 10 | 9,0 | 2 | $18,3 \cdot 10^6$  | 1,08 |
| 67 | 10 | 9,0 | 3 | $16,74 \cdot 10^6$ | 0,97 |
| 68 | 10 | 9,0 | 4 | $15,24 \cdot 10^6$ | 0,91 |

Полученные результаты исследований были обработаны с помощью методов математической статистики в программе «STATISTICA 6.0».

### **3.2 Исследование влияния параметров электроозонирования и количества обработок на концентрацию клеток микроводоросли хлореллы**

Для определения степени влияния параметров электроозонирования на концентрацию клеток микроводоросли хлореллы был проведён регрессионный анализ, данные для которого сведены в таблицу 3.6, и получена математическая модель в виде уравнения множественной регрессии, которое приняло вид:

$$C_{хл} = 17,44 + 0,51C_{o_3} - 0,13M + 0,29\tau C_{o_3} - 0,49\tau M + 0,29C_{o_3}M + 0,57C_{o_3}^2 - 0,24M^2 + 0,49C_{o_3}^3 - 0,22M^3 \quad (3.5)$$

Таблица 3.6 – Результаты регрессионного анализа для зависимой переменной концентрация клеток

|   | <b>Коэффициент при переменной</b> | <b>Стандартная ошибка оценки</b> | <b>Сдвиг и нестандартизированный коэффициент</b> | <b>Стандартная ошибка оценки св. члена</b> | <b>t(64)</b> | <b>p – уровень значимости</b> |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|--|--|--------------|-------------------------------|
| Сдвиг   |                                   |                                  | 17,43901   | 0,989975                                   | 17,59882     | 0,000000                      |
| $\tau$  | -0,039759                         | 0,123913                         | -0,06478   | 0,198308                                   | -0,25986     | 0,697863                      |
| $C_{o_3}$   | 0,515761                          | 0,108713                         | 0,79899  | 0,179208                                   | 4,20013      | 0,000096                      |
| $M$   | -0,135657                         | 0,124913                         | -0,48122   | 0,199215                                   | -1,78534     | 0,100375                      |
| $\tau C_{o_3}$  | 0,294330                          | 0,198762                         | 0,23284  | 0,089181                                   | 1,79954      | 0,058715                      |
| $\tau M$  | -0,493203                         | 0,203404                         | -0,29332   | 0,200032                                   | -2,78110     | 0,005890                      |
| $C_{o_3} M$   | 0,292234                          | 0,204016                         | 0,12841  | 0,060001                                   | 2,58535      | 0,020001                      |
| $\tau^2$  | -0,035743                         | 0,126713                         | -0,06977   | 0,197407                                   | -0,40817     | 0,687465                      |
| $C_{o_3}^2$   | 0,567892                          | 0,115013                         | 0,87007  | 0,210308                                   | 4,24327      | 0,000095                      |
| $M^2$   | -0,235706                         | 0,115013                         | -0,40468   | 0,210308                                   | -1,88555     | 0,059795                      |
| $\tau^3$  | -0,051859                         | 0,115013                         | -0,10370   | 0,210308                                   | -0,29458     | 0,720763                      |
| $C_{o_3}^3$   | 0,487761                          | 0,115013                         | 0,86797  | 0,210308                                   | 4,16739      | 0,000095                      |
| $M^3$   | -0,220007                         | 0,115013                         | -0,39503   | 0,210308                                   | -1,89332     | 0,063705                      |
| $\tau C_{o_3} M$  | -0,086003                         | 0,123039                         | -0,01495   | 0,020946                                   | -0,70886     | 0,507096                      |
| R = 0,91, r <sup>2</sup> = 0,87, F(3,64)=6,2336, p< 0,00089 |                                   |                                  |  |  |              |                               |

В результате установлена тесная ( $R = 0,91$ ) корреляционная взаимосвязь между концентрацией клеток и временем обработки, концентрацией озона и периодичностью обработки. Также установлено, что 85% случаев факторы, включённые в уравнение, влияют на концентрацию клеток хлореллы, а 15% контролируются другими факторами, неучтёнными при построении математической модели. Такими факторами могут быть: температура питательной среды, уровень pH раствора суспензии. Проведённые  $t$ -тесты для

отдельных коэффициентов регрессии, показывают, насколько значимой является влияние той или иной переменной  $x$  на  $y_1$  при условии, что все другие  $x$ -переменные остаются неизменными.

Сдвиг определяет прогнозируемое значение  $y_1$ , когда все переменные  $x$  равны 0 (в нашем случае  $a = 17,44$ ) и интерпретируется следующим образом: типичная концентрация клеток в одном миллилитре раствора суспензии хлореллы, не прошедшей обработку составляет 17,44млн.кл/мл. Коэффициенты регрессии интерпретируются как влияние каждой из переменных на величину концентрации клеток, если все другие независимые переменные остаются неизменными.

Большой уровень значимости для показателя концентрации клеток имеет коэффициент регрессии при  $C_{O_3}$ -переменной ( $C_{O_3} = 0,51, p = 0,0001$ ). Он показывает, что, при всех прочих равных условиях, концентрации клеток выше на 0,51% за счёт обработки с определённой концентрацией озона. Так же существенное влияние (0,3% и 0,29 соответственно) на увеличение концентрации клеток оказывает совокупность таких факторов как  $C_{O_3} \times \tau$  ( $C_{O_3} \tau = 0,3, p = 0,02$ ) и  $\tau C_{O_3}$  ( $\tau C_{O_3} = 0,29, p = 0,06$ ). Таким образом, производится интерпретация всех коэффициентов при переменных  $x$  в случае, если эти значения являются значимыми (уровень значимости  $p < 0,05$ ). Если коэффициент является незначимым (т.е.  $p > 0,05$ ), то он не подлежит интерпретации и может быть исключен из уравнения, в связи с тем, что он не несет дополнительной информации для прогнозирования значения концентрации клеток.

По результатам проведенных исследований (таблица 3.5) были построены диаграммы (рисунки 3.6–3.9) и выведены уравнения множественной регрессии (3.6–3.7), отражающие влияние исследуемых факторов (время обработки  $\tau$ , концентрация озона  $C_{O_3}$ , количество обработок в четыре дня  $T$ ) на независимую переменную  $C_{хл}$  (концентрация клеток хлореллы в суспензии).

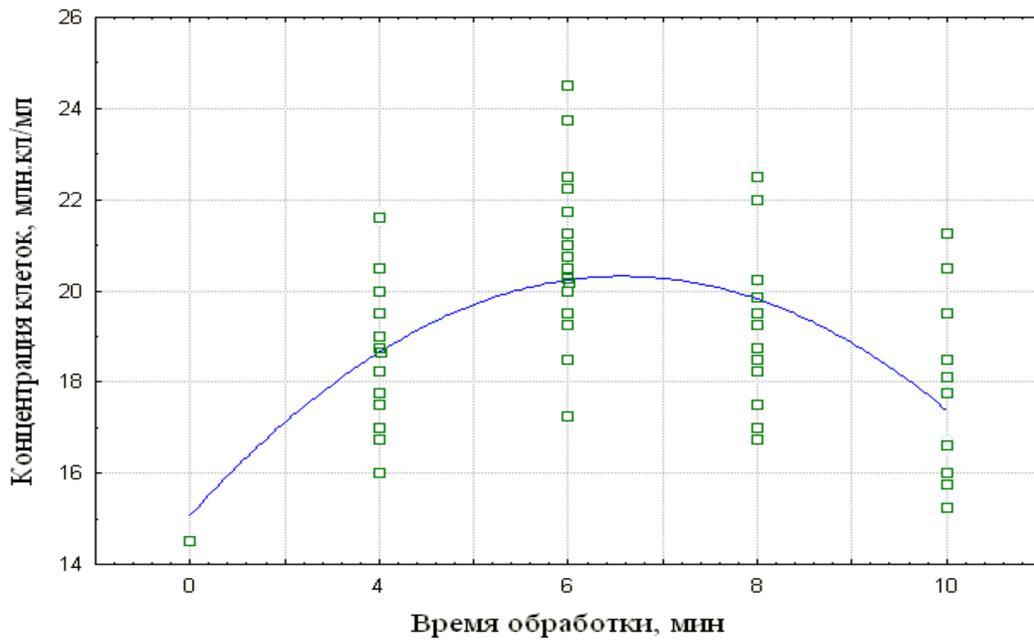


Рисунок 3.6—Диаграмма влияния времени обработки на концентрацию клеток хлореллы в суспензии.

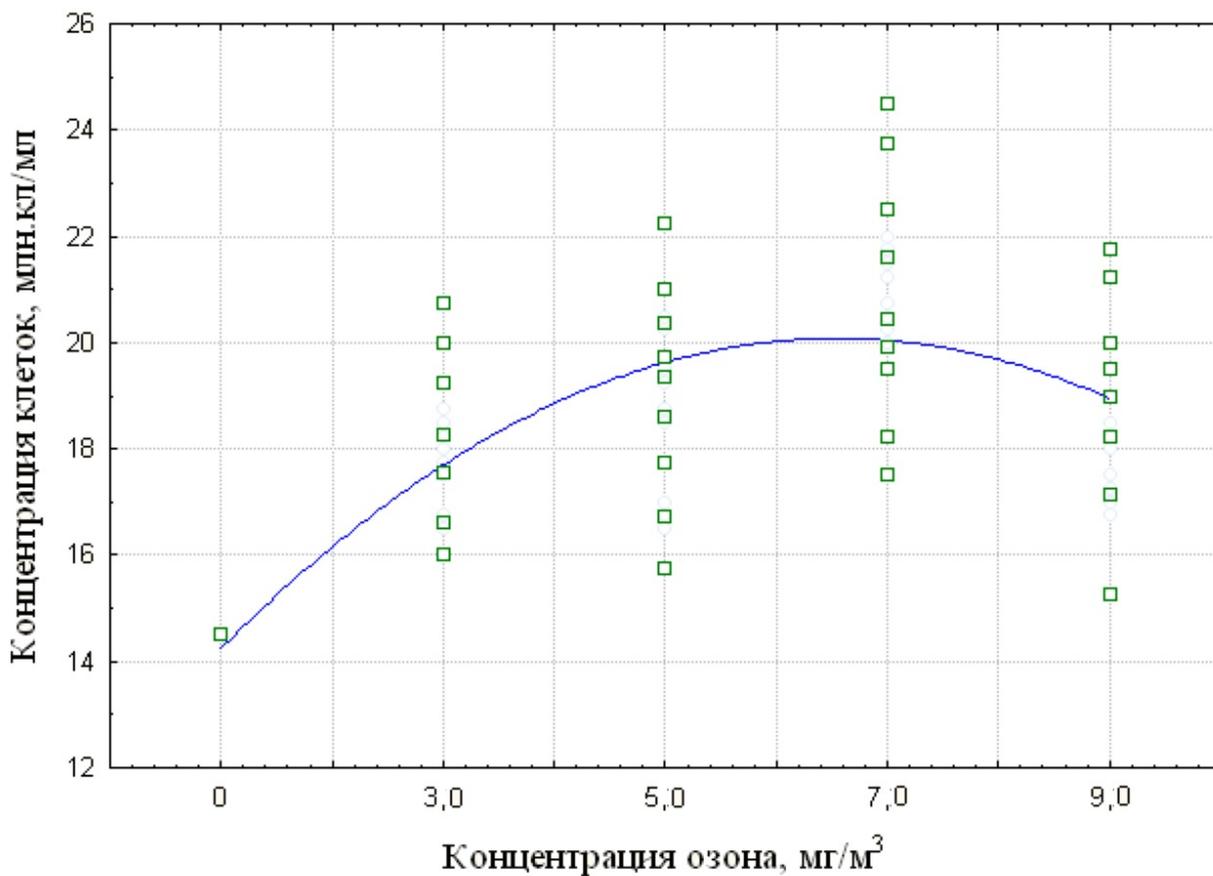


Рисунок 3.7— Диаграмма влияния концентрации озона на концентрацию клеток хлореллы в суспензии.



По результатам статистического анализа получено уравнение множественной регрессии, которое показывает влияние исследуемых факторов на независимую переменную - концентрация клеток хлореллы:

$$C_{xl} = 7,02 + 3,48 \cdot \tau + 4,533 \cdot C_{o_3} - 0,622 \cdot \tau^2 + 0,086 \cdot \tau \cdot C_{o_3} - 0,638 \cdot C_{o_3}^2 \quad (3.6)$$

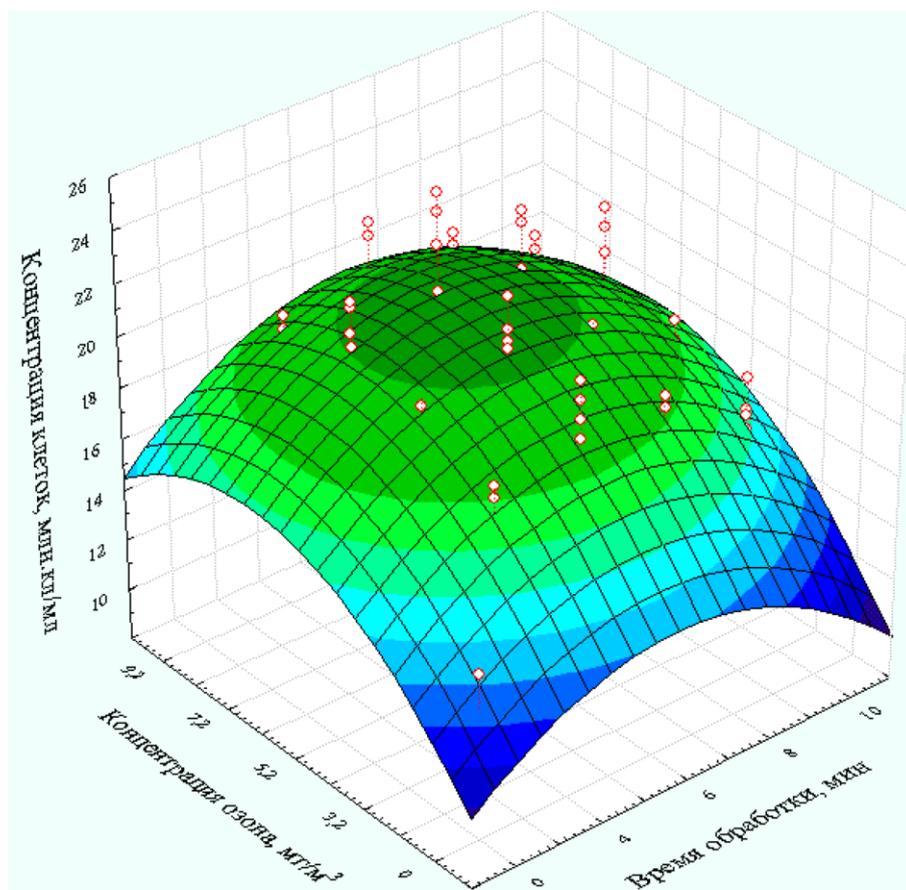


Рисунок 3.9 - Диаграмма влияния времени обработки и концентрации озона на концентрацию клеток хлореллы в суспензии у<sub>1</sub>.

Необходимо также отметить, что при обработке суспензии с концентрацией озона в 7,0 мг/м<sup>3</sup> получены наивысшие результаты концентрации клеток хлореллы, следовательно, для нахождения эффективного воздействия озона необходимо определить периодичность такой обработки.

С этой целью была построена диаграмма зависимости концентрации клеток хлореллы в суспензии у<sub>1</sub> от концентрации озона C<sub>o3</sub> и количества

обработок Тза четыре дня (рисунок 3.10). Проведя анализ полученной поверхности можно сказать, что при концентрации озона в 7,0 мг/м<sup>3</sup> увеличение концентрация клеток хлореллы наблюдается при повторении обработки с 1 до 2 раз в четыре дня. С увеличением числа обработок происходит уменьшение концентрации клеток хлореллы в суспензии. Следовательно, целесообразно проводить обработку с периодичностью 2 раза в четыре дня.

Выведено уравнение множественной регрессии влияния исследуемых факторов (концентрации озона  $C_{o_3}$ , количество обработок в четыре дня  $x_3$ ) на независимую переменную - концентрация клеток хлореллы:

$$C_{xl} = 7,56 + 5,5 \cdot C_{o_3} + 1,72 \cdot M - 0,712 \cdot C_{o_3}^2 - 0,091 \cdot C_{o_3} \cdot M - 0,45 \cdot M^2 \quad (3.7)$$

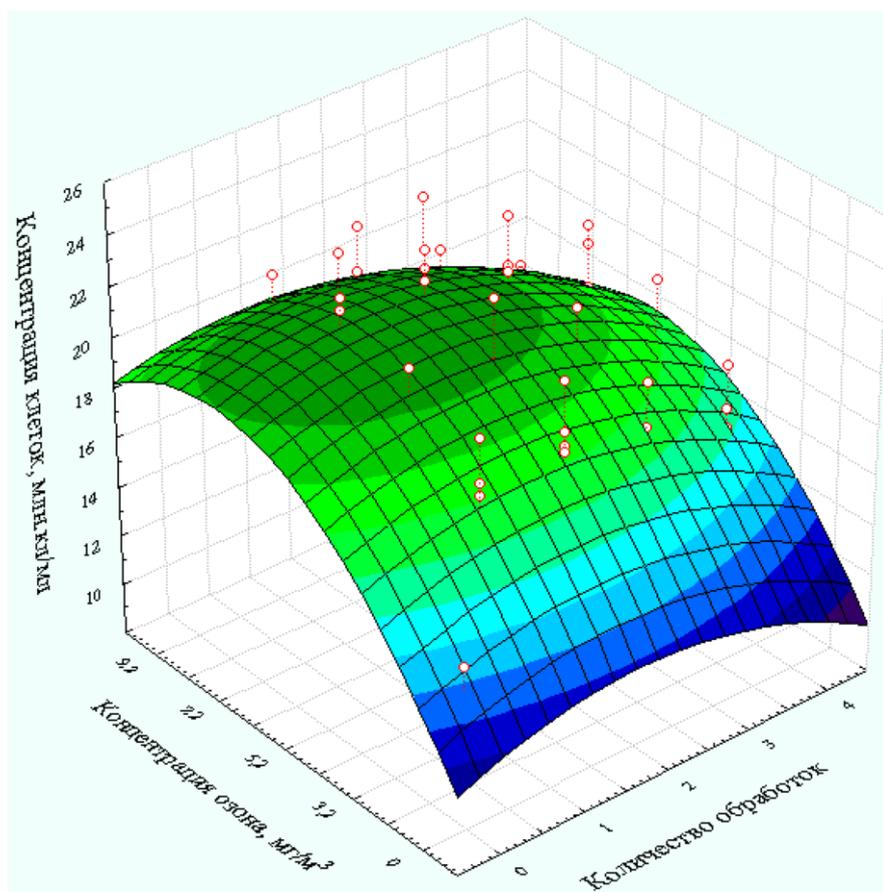


Рисунок 3.10 - Диаграмма зависимости концентрации клеток хлореллы в суспензии  $C_{xl}$  от концентрации озона и количества обработок за четыре дня.

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшего увеличения концентрации клеток хлореллы при её культивировании с применением озоноздушной обработки можно достичь при следующих параметрах:

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

### **3.3 Исследование влияния параметров электроозонирования и количества обработок на оптическую плотность суспензии микроводоросли хлореллы**

С целью определения степени влияния изучаемых факторов на оптическую плотность раствора суспензии хлореллы был проведён регрессионный анализ, данные для которого сведены в таблицу 3.7, и получена математическая модель в виде уравнения множественной регрессии, которое имеет вид:

$$D_{xl} = 1,05 + 0,48C_{o_3} - 0,22M + 0,37\tau C_{o_3} - 0,54\tau M + 0,29C_{o_3}M + 0,45C_{o_3}^2 - 0,25M^2 + 0,45C_{o_3}^3 - 0,2M^3 \quad (3.8)$$

Таблица 3.7 – Результаты регрессионного анализа для зависимой переменной оптическая плотность

|                | Коэффициент при переменной | Стандартная ошибка оценки | Сдвиг и нестандартный коэффициент | Стандартная ошибка оценки св. члена | t(64)    | p – уровень значимости |
|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------|------------------------|
| Сдвиг          |                            |                           | 1,050732                          | 0,055983                            | 17,4307  | 0,000000               |
| $\tau$         | -0,045717                  | 0,12351                   | -0,004310                         | 0,011980                            | -0,26898 | 0,788032               |
| $C_{o_3}$      | 0,481337                   | 0,12351                   | 0,048215                          | 0,013230                            | 4,23424  | 0,000082               |
| $M$            | -0,223829                  | 0,12351                   | -0,025084                         | 0,013230                            | -1,98235 | 0,057009               |
| $\tau C_{o_3}$ | 0,373201                   | 0,20371                   | 0,010485                          | 0,004989                            | 1,84313  | 0,060216               |
| $\tau M$       | -0,543187                  | 0,20687                   | -0,022360                         | 0,008355                            | -2,82309 | 0,007500               |
| $C_{o_3} M$    | 0,298868                   | 0,12093                   | 0,009177                          | 0,003420                            | 2,50332  | 0,015234               |

|   |           |         |           |          |          |          |
|---|-----------|---------|-----------|----------|----------|----------|
| $\tau^2$  | -0,030919 | 0,12351 | -0,003380 | 0,013034 | -0,26988 | 0,903031 |
| $C_{O_3}^2$   | 0,452488  | 0,12351 | 0,049215  | 0,013034 | 4,09825  | 0,000082 |
| $M^2$   | -0,254723 | 0,12351 | -0,025085 | 0,013034 | -1,96245 | 0,055078 |
| $\tau^3$  | -0,029918 | 0,12351 | -0,003380 | 0,013034 | -0,25800 | 0,894031 |
| $C_{O_3}^3$   | 0,452487  | 0,12351 | 0,049215  | 0,013034 | 4,09825  | 0,000084 |
| $M^3$   | -0,204721 | 0,12351 | -0,025085 | 0,013034 | -1,96245 | 0,055073 |
| $\tau C_{O_3} M$                                    | -0,070688 | 0,12392 | -0,000789 | 0,001317 | -0,58363 | 0,597791 |
| $R = 0.92, r^2 = 0.86, F(3,64)=6,4207, p < 0,00072$ |           |         |           |          |          |          |

В результате установлена тесная ( $R = 0,92$ ) корреляционная взаимосвязь между оптической плотностью и изучаемыми факторами. Также установлено, что в 86% случаев факторы, включённые в уравнение, влияют на оптическую плотность раствора суспензии хлореллы, а доля вариаций, определяемая выражением  $1 - R^2$ , т.е. 13% оказывается необъяснённой. Проведённые  $t$ -тесты для отдельных коэффициентов регрессии, показывают, насколько значимой является влияние той или иной переменной  $x$  на  $D_{хл}$  при условии, что все другие  $x$ -переменные остаются неизменными.

Сдвиг определяет прогнозируемое значение  $D_{хл}$ , когда все переменные  $x$  равны 0 (в нашем случае  $a = 1,05$ ) и интерпретируется следующим образом: типичная оптическая плотность раствора суспензии хлореллы, не прошедшей обработку составляет 1,05. Коэффициенты регрессии интерпретируются как влияние каждой из переменных на величину оптической плотности, если все другие независимые переменные остаются неизменными.

Основное значение для показателя оптической плотности имеет коэффициент регрессии при  $C_{O_3}$ -переменной ( $C_{O_3} = 0,45, p = 0,000082$ ). Он показывает, что, при всех прочих равных условиях, оптическая плотность раствора суспензии хлореллы выше на 0,45% за счёт обработки определённой концентрацией озона. Так же существенное влияние (0,3% и 0,37 соответственно) на увеличение оптической плотности оказывает совокупность таких факторов как  $C_{O_3}M$  ( $C_{O_3}M = 0,3, p = 0,015$ ) и  $\tau x_2$  ( $\tau C_{O_3} = 0,37, p = 0,06$ ).

По результатам проведенных исследований (таблица 3.5) были

построены диаграммы (рисунки 3.11–3.15).

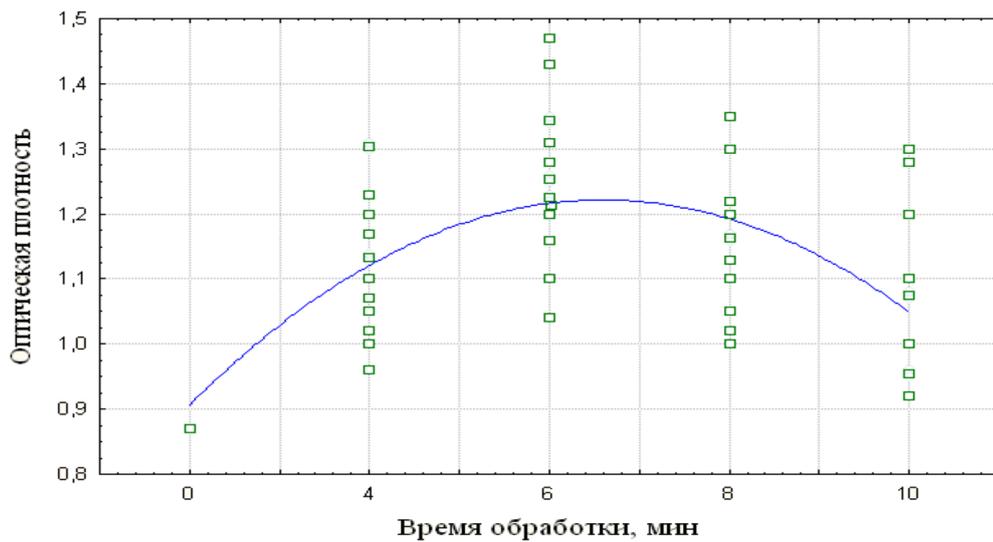


Рисунок 3.11—Диаграмма зависимости оптической плотности суспензии от времени обработки.

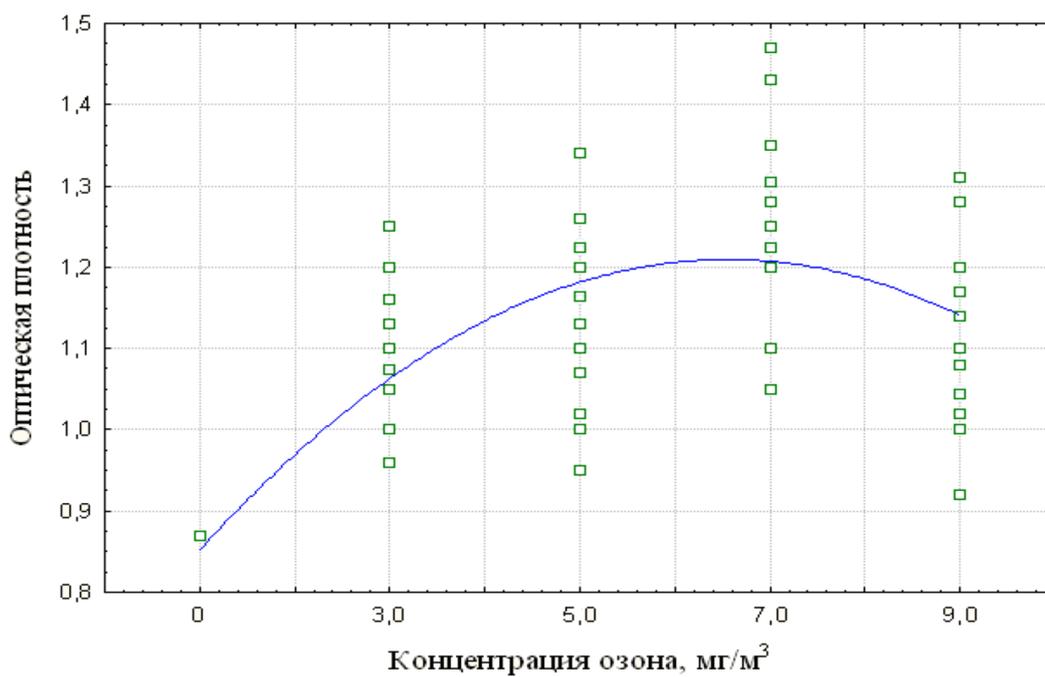


Рисунок 3.12 – Диаграмма зависимости оптической плотности суспензии от концентрации озона.

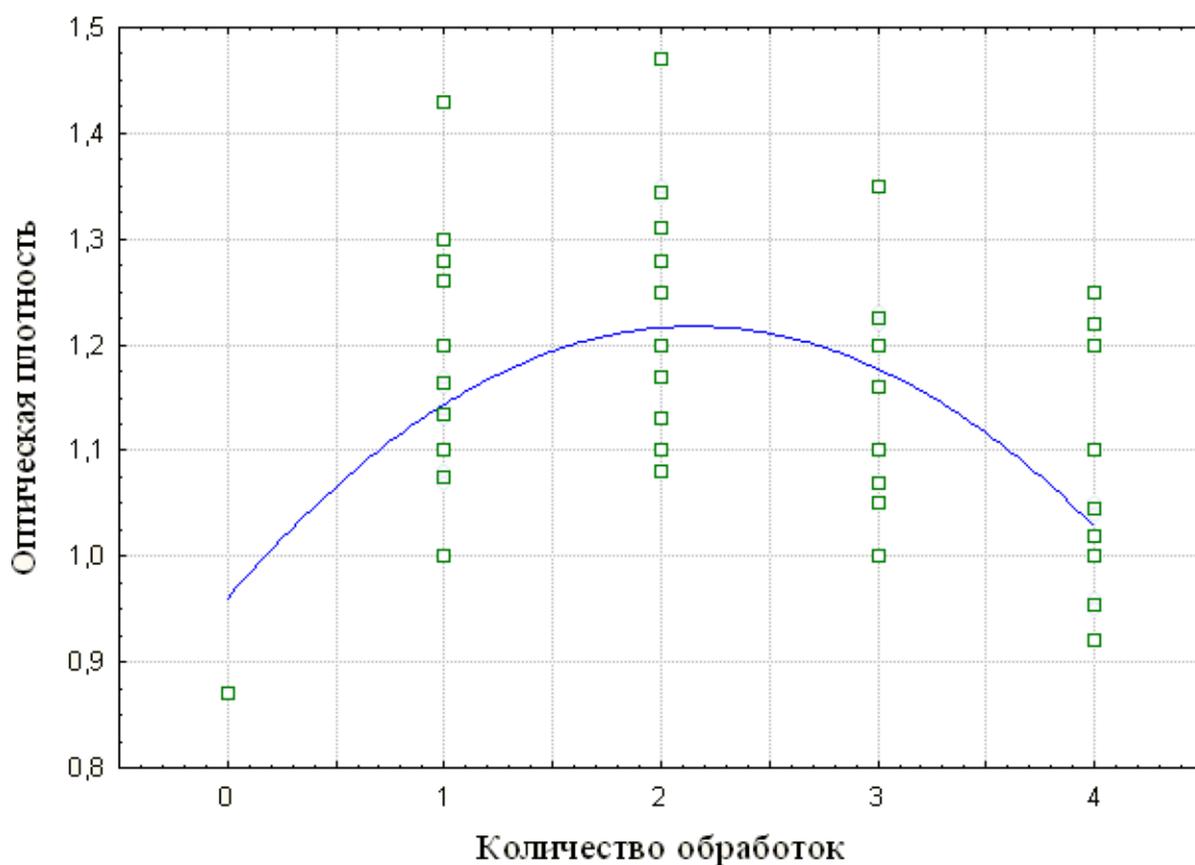


Рисунок 3.13—Диаграмма зависимости оптической плотности суспензии от количества обработок.

По полученным данным также построены диаграммы влияния времени обработки  $\tau$  и концентрации озона  $C_{O_3}$  на оптическую плотность раствора суспензии хлореллы  $y_2$ , представленная на рисунке 3.14. Проанализировав данную диаграмму можно прийти к выводу, что с увеличением концентрации озона  $C_{O_3}$  и времени обработки  $\tau$  происходит увеличение оптической плотности раствора суспензии хлореллы до момента, когда концентрации озона составляет  $7,0 \text{ мг/м}^3$  при времени обработки 6 минут. При этих значениях оптическая плотность раствора суспензии достигает своего пика. Дальнейшее увеличение концентрации озона и времени обработки приводит к снижению значений оптической плотности. Следовательно, целесообразно проводить озоновоздушную обработку суспензии хлореллы при выявленных значениях независимых переменных  $\tau$  и  $C_{O_3}$ .

Уравнение регрессии, для данного способа обработки имеет вид:

$$D_{\text{хл}} = 0,46 + 0,21 \cdot \tau + 0,29 \cdot C_{\text{о}_3} - 0,046 \cdot \tau^2 + 0,006 \cdot \tau \cdot C_{\text{о}_3} - 0,05 \cdot C_{\text{о}_3}^2 \quad (3.9)$$

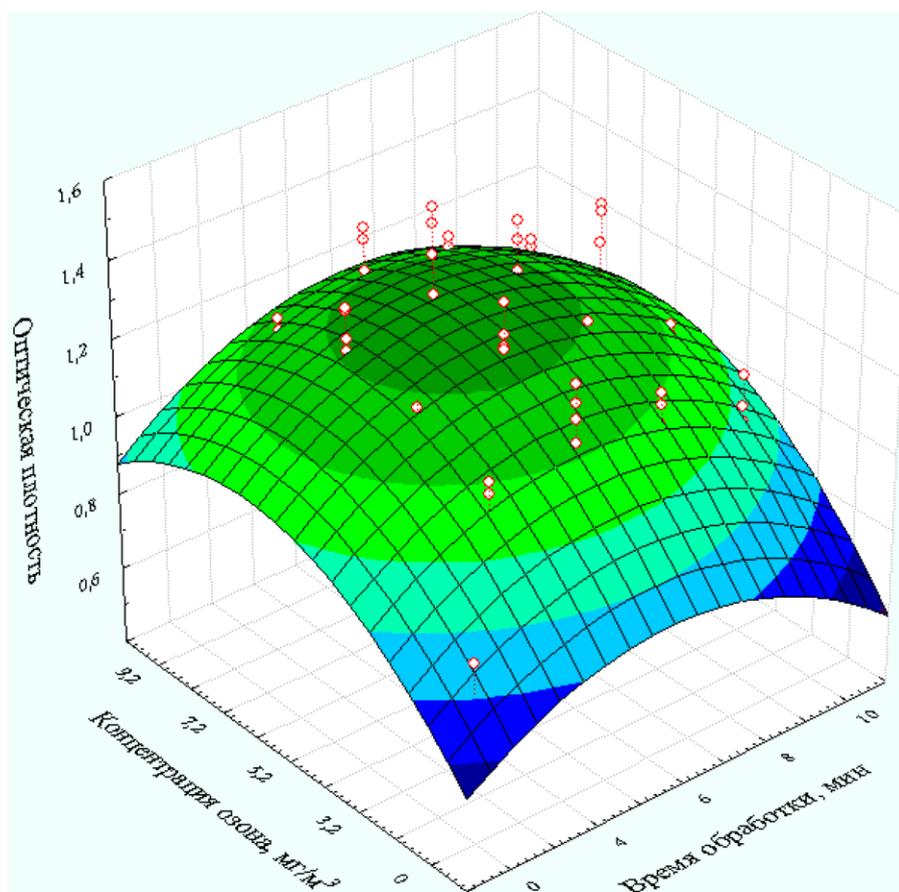


Рисунок 3.14 - Диаграмма влияния времени обработки  $\tau$  и концентрации озона  $C_{\text{о}_3}$  на оптическую плотность раствора суспензии хлореллы  $y_2$ .

Так как при обработке суспензии хлореллы с концентрацией озона в  $7,2 \text{ мг/м}^3$  и временем обработки 6 минут получены наивысшие результаты оптической плотности раствора суспензии, то для нахождения эффективного воздействия озона необходимо определить периодичность такой обработки.

Для определения периодичности построена диаграмма зависимости оптической плотности раствора суспензии хлореллы  $D_{\text{хл}}$  от концентрации озона  $C_{\text{о}_3}$  и количества обработок  $M$  за четыре дня, которая представлена на рисунке 3.15.

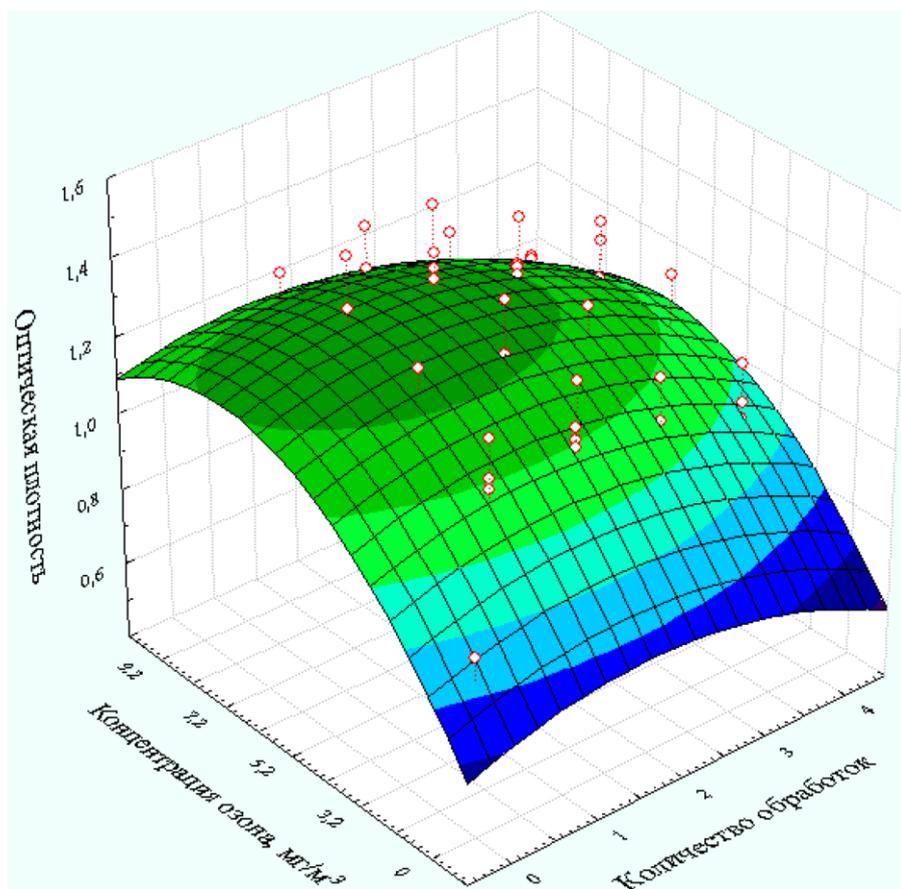


Рисунок 3.15 - Диаграмма зависимости оптической плотности раствора суспензии хлореллы  $y_2$  от концентрации озона  $C_{O_3}$  и количества обработок  $M$  за четыре дня.

Проведя анализ полученной поверхности можно сказать, что при концентрации озона в  $7,0 \text{ мг/м}^3$  увеличение оптической плотности раствора суспензии хлореллы наблюдается при повторении обработки с 1 до 2 раз в четыре дня. С увеличением числа обработок происходит уменьшение оптической плотности суспензии. Следовательно, целесообразно проводить обработку с периодичностью 2 раза в четыре дня.

По результатам статистического анализа получено уравнение множественной регрессии, которое показывает влияние исследуемых факторов на независимую переменную – оптическую плотность:

$$D_{xл} = 0,45 + 0,37 \cdot C_{O_3} + 0,12 \cdot M - 0,046 \cdot C_{O_3}^2 - 0,005 \cdot C_{O_3} M_3 - 0,023 \cdot M^2 \quad (3.10)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшего увеличения оптической плотности суспензии хлореллы при её культивировании с применением озонозвоздушной обработки можно достичь при следующих значениях параметров:

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

Результаты проведённых исследований показали, что за двое суток культивирования хлореллы концентрация её клеток была выше во всех вариантах с обработкой озоном по сравнению с контрольным вариантом. Наивысшие показатели по каждому уровню обработки были сведены в таблицу 3.8.

Таблица 3.8 – Влияние озонозвоздушной обработки на рост клеток хлореллы

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

Наибольшая концентрация клеток хлореллы из всех вариантов обработки озоном был получена с концентрацией озона - 7,0 мг/м<sup>3</sup>, что на 10,4 – 19% выше по сравнению с другими вариантами обработки озоном и на 70% выше по сравнению с контролем. При этом же варианте обработки получена наивысшая оптическая плотность раствора суспензии хлореллы. Однако необходимо отметить, что повышение концентрации озона выше эффективного уровня оказывает негативное, угнетающее воздействие на молодые клетки хлореллы.

### 3.4 Выводы по главе

1. Полученные уравнения регрессии (3.5 и 3.8) позволяют определить степень влияния каждого фактора на процесс стимулирования микроводоросли хлореллы.

2. Проведённый регрессионный анализ экспериментальных данных, показал, что исследуемые параметры (концентрация, время обработки, количество обработок) в 87% случаев влияют на увеличение концентрации клеток хлореллы и в 86% случаев влияют на увеличение оптической плотности раствора суспензии хлореллы.

3. По результатам экспериментальных исследований определены режимы обработки суспензии хлореллы штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №С – 111, позволяющие в два раза увеличить производительность культиватора:

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

## **4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРООЗОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СТИМУЛИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛЫ**

### **4.1 Основные этапы технико-экономического обоснования**

Актуальность проекта по производству суспензии хлореллы в Краснодарском крае в 2026г. обусловлена следующими макроэкономическими межрегиональными факторами:

1. Продовольственная безопасность: в условиях высокой стоимости импортных премиксов, аминокислот, витаминов и ветеринарных препаратов, использование хлореллы как природного биостимулятора позволяет сократить падеж молодняка КРС на 15–20% и увеличить привес на 10–12%.
2. Климатический потенциал и экологическая повестка региона: Краснодарский край обладает избыточной солнечной инсоляцией и развитой базой агрохолдингов, что минимизирует затраты на логистику и обеспечивает стабильный спрос. Необходима также биологическая очистка водоемов и рыбоводных прудов Краснодарского края от «цветения» (сине-зеленых водорослей).
3. Инфляционная защита: при прогнозируемой инфляции в 5,5% и ключевой ставке 15,5%, вложения в реальный производственный сектор с циклом окупаемости до 1 года являются наиболее эффективной стратегией сбережения капитала [107].

Для проведения инвестиционной оценки проекта по производству суспензии хлореллы в Краснодаре (февраль 2026г.) ниже представлен детальный расчет себестоимости, точки безубыточности и рентабельности на 1 тонн у готовой продукции. Для реализации проекта по производству 40 тонн суспензии хлореллы в месяц на базе 10 емкостей-ванн в собственном помещении представим следующий детальный расчет.

## Капитальные вложения (И)

Эконом-вариант предполагает использование открытых систем культивирования, что минимизирует стартовые затраты—таблица.

Таблица 4.1- Стартовые затраты проекта

| Статья расходов                 | Сумма(руб.)    | Комментарий                                  |
|---------------------------------|----------------|--|
| Емкости(10шт.)                  | 350000         | Полипропиленовые химически стойкие ванны     |
| Система освещения(LED)          | 400000         | Спектральные лампы для фотосинтеза           |
| Аэрация и насосное оборудование | 250000         | Компрессоры, шланги, распылители             |
| Лабораторное оборудование       | 150000         | Микроскоп, рН-метр, весы                     |
| Оборотный капитал               | 350000         | Запас сырья и фонд оплаты труда на 1-й месяц |
| <b>ИТОГО ИНВЕСТИЦИЙ (И)</b>     | <b>1500000</b> |  |

Ниже представлено детальное сравнение базового сценария (40 тонн) и модернизированного варианта с установкой озонатора, который увеличивает выход суспензии на 71%( до 68,4 тонн) [128].

Таблица 4.2-Сравнительный анализ входных параметров

| Параметр        | Проект А (Базовый) | Проект Б (С озонатором) | Изменение |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-----------|
| Инвестиции (И)  | 1500000 руб.       | 1570000 руб.            | +4,6%     |
| Объем продукции | 40тонн/мес.        | 68,4тонны/мес.          | +71%      |

|                            |                  |                    |       |
|----------------------------|------------------|--------------------|-------|
| (О)                        |                  |                    |       |
| Цена реализации (Ц)        | 50000руб./т      | 50000руб./т        | -     |
| Переменные затраты (Спер)  | 4457руб./т       | 4457руб./т*        | -     |
| Постоянные затраты (Зпост) | 150000 руб./мес. | 155000 руб./мес.** | +3,3% |

\*Примем переменные затраты на тонну равными, так как технологи культивирования сохраняется.

\*\*Добавлена минимальная надбавка на обслуживание озонатора и дополнительную электроэнергию.

## РАСЧЕТ ФИНАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТА Б (ИННОВАЦИОННЫЙ)

Шаг 1. Валовая выручка (В)

$V = \text{Объем (О)} * \text{Цена (Ц)}$

- Проект А (Базовый):  $40 \text{ т} * 50000 \text{ руб.} = 2000000 \text{ руб.}$
- Проект Б (Озонатор):  $68,4 \text{ т} * 50000 \text{ руб.} = 3420000 \text{ руб.}$

Шаг 2. Совокупные переменные затраты (Зпер)

$Z_{\text{пер}} = \text{Объем (О)} * \text{Переменные затраты на 1т (4457 руб.)}$

- Проект Б:  $68,4 \text{ т} * 4457 \text{ руб.} = 304858,8 \text{ руб.}$

Шаг 3. Маржинальный доход (МД)

$MД = \text{Выручка (В)} - \text{Переменные затраты (Зпер)}$

- Проект Б:  $3420000 - 304858,8 = 3115141,2 \text{ руб.}$

Шаг 4. Чистый денежный поток (ЧДП) в месяц

$ЧДП = MД - \text{Постоянные затраты (З пост)} - \text{Налог (Н)}$

1. Налог (УСН 1%):  $3420000 * 0,01 = 34200 \text{ руб.}$

2. Постоянные расходы: 155000 руб.

ИТОГО ЧДП проекта Б:  $3115141,2 - 155000 - 34200 = 2925941,2$  руб.

## РАСЧЕТ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

### 1. Исходные данные для расчета

- Ставка дисконтирования (Сд): 20% годовых или 0,0167 в месяц (расчет:  $20/12$  месяцев/100).
- Срок проекта: 36 месяцев (3 года).
- Коэффициент накопленного дисконта (Кд): Рассчитывается для 36 месяцев.
- $Кд = 26,96$  (это множитель, который приводит сумму будущих прибылей к сегодняшним деньгам).
- Чистый денежный поток в месяц (ЧДП):  
Эконом-вариант: 1651720 руб.  
С озонатором: 2925941 руб.

2. Расчет ТЕКУЩЕЙ СТОИМОСТИ (ТС) Это общая сумма прибыли за 3 года, пересчитанная на сегодняшний день.

- Эконом-вариант:  $1651720 * 26,96 = 44530371$  руб.
- Вариант с озонатором:  $2925941 * 26,96 = 78883369$  руб.
- Разница:  $78883369 - 44530371 = 34352998$  руб.

### 3. Расчет ЧИСТОГО ДИСКОНТИРОВАННОГО ДОХОДА (ЧДД)

Это чистая прибыль инвестора за 3 года за вычетом вложенных денег.

- Эконом-вариант:  $44530371 - 1500000 = 43030371$  руб.
- Вариант с озонатором:  $78883369 - 1570000 = 77313369$  руб.
- Разница:  $77313369 - 43030371 = 34282998$  руб.

4. Расчет ИНДЕКСА ПРИБЫЛЬНОСТИ (ИП) Показывает, сколько рублей дохода приносит каждый вложенный 1 рубль.

- Эконом-вариант:  $44530371 / 1500000 = 29,69$  руб.
- Вариант с озонатором:  $78883369 / 1570000 = 50,24$  руб.

- Разница:  $50,24 - 29,69 = 20,55$  руб.

5. Расчет СРОКА ОКУПАЕМОСТИ (СДО) Время (в днях), за которое доходы первого месяца полностью покроют вложения.

- Шаг1. Дисконтированный доход за 1-й месяц (ТС1):
  - Эконом:  $1651720 / 1,0167 = 1624590$  руб.
  - Озонатор:  $2925941 / 1,0167 = 2877880$  руб.
- Шаг2. Срок окупаемости в долях месяца:
  - Эконом:  $1500000 / 1624590 = 0,923$  мес.
  - Озонатор:  $1570000 / 2877880 = 0,545$  мес.
- Шаг3. Срок в днях (умножаем на 30 дней):
  - Эконом:  $0,923 * 30 = 27,7$  дня
  - Озонатор:  $0,545 * 30 = 16,4$  дня (округленно 16,5)
- Эффект: Ускорение возврата денег на 11,2 дня.

Таблица 4.3 - Сравнительный анализ инвестиционных проектов

| Показатель/Статья расхода    | Эконом-вариант(40т) | С озонатором(68,4т) | Разница (эффект) |
|------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| ИНВЕСТИЦИИ(И)                | 1500000руб.         | 1570000руб.         | +70000 руб.      |
| ОБЪЕМ ВЫХОДА(О)              | 40тонн              | 68,4тонны           | +28,4 тонны      |
| 1.ВЫРУЧКА(В)                 | 2000000руб.         | 3420000руб.         | +1420000 руб.    |
| 2.ПЕРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ (Зпер)  | 178280руб.          | 304859руб.          | +126579 руб.     |
| 3.ПОСТОЯННЫЕ ЗАТРАТЫ (Зпост) | 150000руб.          | 155000руб.          | +5000 руб.       |
| 4.НАЛОГ(УСН1%)               | 20000руб.           | 34200руб.           | +14200 руб.      |

|                              |              |              |                    |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------------|
| 5.ЧИСТЫЙ ДЕНЕЖНЫЙ ПОТОК(ЧДП) | 1651720руб.  | 2925941руб.  | +1274221 руб.      |
| 6.ТЕКУЩАЯ СТОИМОСТЬ (ТС)     | 44530371руб. | 78883369руб. | +34352998 руб.     |
| 7.ЧИСТЫЙ ДОХОД (ЧДД)         | 43030371руб. | 77313369руб. | +34282998 руб.     |
| 8.ИНДЕКС ПРИБЫЛИ (ИП)        | 29,69руб.    | 50,24руб.    | +20,55 руб.        |
| 9.СРОК ОКУПАЕМОСТИ           | 27,7дня      | 16,5дня      | Быстрее на 11 дней |

На рисунке 4.1 графически наглядно представим критический объем производства, ниже которого проект начнет приносить убытки.

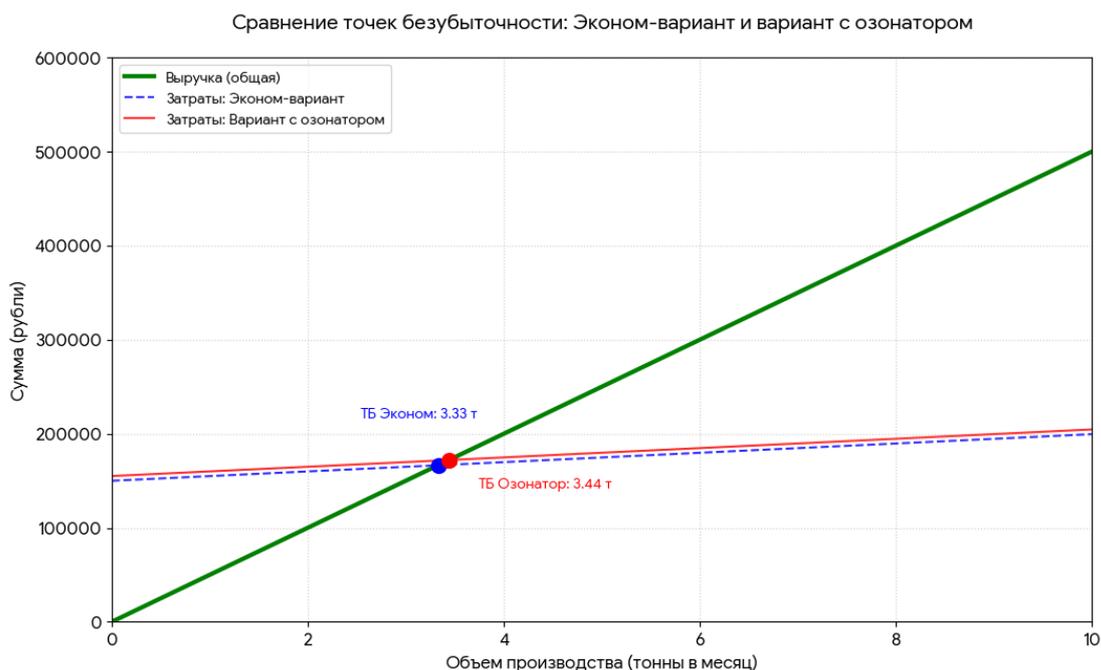


Рисунок 4.1 -Сравнение точек безубыточности

1. Линия выручки (зеленая) показывает доход при цене 50000 руб. за тонну.

2. Линия затрат эконом (синяя пунктирная) стартует со 150000 руб.
3. Линия затрат озонатор (красная сплошная) стартует со 155000 руб.

Как видно на графике, линии затрат идут почти параллельно и очень близко друг к другу. Это визуально подтверждает, что внедрение озонатора не несет существенной финансовой нагрузки на проект, но позволяет увеличить плановый объем реализации с 40 до 68,4 тонн, что выводит проект на принципиально иной уровень прибыли.

Для исследуемого проекта это 3,44 тонны (при плане в 68,4 тонны), даже если производство загружено всего на 5% от мощности, проект уже не теряет деньги, а покрывает все расходы (зарплату, налоги, электричество). Расстояние на графике между точкой безубыточности и плановым объемом реализации называется запасом финансовой прочности. В варианте с озонатором этот запас составляет 20 раз. Это главный аргумент для инвестора или банка. Проект с таким запасом прочности выдержит любое падение спроса или цен на рынке.

На графике видно, что линия затрат варианта с озонатором почти совпадает с эконом-вариантом (разница в точке безубыточности в сего 110 кг). Это доказывает, что покупка озонатора за 70000 руб. практически не увеличивает риски проекта, но при этом открывает возможность получать сверхприбыль за счет роста объема производства. Каждая следующая произведенная тонна дает почти чистую прибыль, так как постоянные расходы уже «оплачены» первыми четырьмя тоннами. Это мотивирует к максимальной загрузке мощностей. Если в какой-то месяц производство падает (например, из-за технических работ), график служит ориентиром. Руководитель производства четко видит «красную зону». Если объем за месяц выше 3,5 тонн—паники быть не должно, предприятие в безопасности.

#### **4.2 Выводы по главе**

Детальный расчет подтверждает эффективность варианта с озонатором. Несмотря на то, что стартовые затраты возросли на 70000 руб., проект получает:

1. Дополнительно 34,3 миллиона рублей чистой прибыли за 3 года.
2. Рост отдачи на каждый вложенный рубль (ИП) почти в 2 раза (с 29,7 до 50,2 руб.).

Сокращение срока окупаемости (возврата вложений) почти на 2 недели.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Результаты исследований, содержащиеся в диссертационной работе, имеют существенное значение для сельского хозяйства. Научная исследовательская работа позволила получить необходимые результаты и сделать следующие выводы:

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 озоновоздушной 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 °С), 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°С 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алиев З. Г. Структура и механизм разряда, и процессы образования озона в озонаторах: / З. Г. Алиев, Ю. М. Емельянов, В. Г. Бабаян // Изв. АН СССР Неор. Химия. - 1967. -№11.- С. 2940-2942.
2. Андреева В. М. Морфология, систематика, принципы классификации хлореллы. Ленинград, 1975. 25с.
3. Анискин В. И. О повышении качества семян способами послеуборочной и предпосевной обработки / В. И. Анискин // Подготовка семян при интенсивном зерно производстве. - М., 1987. - С. 3-19.
4. Асанов Р. А. Влияние суспензии хлореллы на рост свиней. - в кн.: Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1971, с. 59-60.
5. Багиров М. А. Исследование электрического разряда в воздухе между электродами, покрытыми диэлектриками / М. А. Багиров, М. А. Курбанов, А. В. Шкилев // Журнал техн. физики. - 1971. - т.41. - вып. 6. - С. 1287-1291.
6. Баранов С. А. Опыт культивирования микроводорослей на выделениях некоторых животных и человека в условиях накопительных культур. - В кн.: Управляемое культивирование микроводорослей. М.: Наука, 1964, с. 86-97.
7. Басов А. М. Вопросы дозирования при стимуляции семян физическими воздействиями / А. М. Басов, Э. А. Камер, Б. В. Фаин // Вестник с.-х. науки.-1981.-№6.-С. 106-116.
8. Бердыкулов Х. А. Фотосинтез хлореллы культивируемой под открытым небом // Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Изд-во "ФАН" УзССР, Ташкент, 1971 г., с. 65-67.
9. Бердыкулов Х. А., Якубов Х. Ф. Дневной ход фотосинтеза и накопление биомассы микроводорослями при выращивании в различных

условиях питания. В кн.: Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Изд-во "ФАН" УзССР, Ташкент, 1971 г., с.44-46.

10. Березина Н. М. Предпосевное облучение семян сельскохозяйственных растений / Н. М. Березина, Д. А. Каушанский. - М.: Наука, 1975. - 215с.

11. Блинова Т. А. Перспективы применения микроводорослей в рационе сельскохозяйственных животных и птицы / Т. А. Блинова, Д. Е. Мирошников, А. М. Патиева // Вестник мясного скотоводства. – 2022. – № 1(117). – С. 101-108.

12. Блонская А. Л. К вопросу механизма воздействия электрического поля на семена / А. П. Блонская, В. А. Окулова // Науч. тр. ЧИМЭСХ, 1977 – Вып. 121.-С. 32-35.

13. Блонская А.Л. Влияние электрического поля на биопотенциал в проростках и растениях пшеницы в начальный период фотосинтеза / А. П. Блонская, В. А. Окулова // Тр. Челяб. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва, 1976. - Вып109.- С. 84-87.

14. Богдан А. В. Анализ конструкций озонаторов/ А.В. Богдан, И.А. Заболотная, Р.С. Шхалахов // межвузовская научная конференция «Энергосберегающие технологии и процессы в АПК: материалы / КубГАУ. – Краснодар, 2003. – С. 34-36.

15. Болтрик О. П. Параметры и режимы работы электроактиватора для предпосевной обработки семян зерновых культур: автореф. дис. канд. техн. наук. - АЧГАА. - Зерноград, 1999. - 21 с.

16. Бородин И. Ф. Электроозонирование воздушной среды в животноводстве / И.Ф. Бородин, Н.В. Ксенз, Т.П. Шубина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1995. - №7. - С. 18-21.

17. Брагинец А. В. Влияние физических и химических способов предпосевной обработки семян озимой пшеницы на ее вегетацию, урожайность и химический состав зерна / А. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников,

П. А. Хоменко // Таврический вестник аграрной науки. – 2024. – № 1(37). – С. 8-20.

18. Брыкалов А. В. Исследование биологически активных веществ – стимуляторов микосимбиотрофизма / А.В. Брыкалов // Современные достижения биотехнологии – вклад в науку и практику XXI века / Всероссийская научно-практическая конференция: материалы. - СГАУ. - Ставрополь, 1999. - С. 17-20.

19. Булатов Н. К. Термодинамика необратимых физико-химических процессов / Н. К. Булатов, А. Б. Лундин. - М.: Химия, 1984. - 334 с.

20. Васигов Т. П. Опыт массового культивирования одноклеточных водорослей на Кызылкумской пустынной станции. - В кн.: О производственной культуре одноклеточных водорослей. Ташкент, 1966, с. 94-100.

21. Васильев Д. В., Чуич В. Г. Системы автоматического управления. М., 1967. С. 420.

22. Вербицкая С. В. Предпосевная обработка семян фасоли магнитным полем и озоном: дис. ... канд. техн. наук. / С. В. Вербицкая; КубГАУ. - Краснодар, 2001. - 133 с.

23. Виленский П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика: учебное пособие /П.Л.Виленский, В.Н.Лившиц, С.А.Смоляк.–7-изд.–М.:Дело,2025.–1104с.

24. Возмилов А. Г. Выделение озона двухзонным электрофильтром / А. Г. Возмилов // «Некоторые вопросы механизации и электрификации сельскохозяйственного производства»: сб. науч. тр. / ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1978. - С. 134-139.

25. Володин В. И. Стимуляция прорастания семян с помощью ультразвука и гиббереллина: Автореф. дис... канд. биол. наук. - Л., 1963. – 19с.

26. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1969. 872 с.

27. Гадзама И. У. Хлорелла обыкновенная как кормовая добавка и компонент корма для сельскохозяйственных животных: всесторонний обзор / И. У. Гадзама, С. Рэй, Р. Мейте [и др.] // *Animals*. – 2025. – Т. 15, № 6. – С. 879.
28. Гольдман Р. Б. Регулируемые факторы воздействия на объекты сельского хозяйства : монография / Р. Б. Гольдман ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина. - Краснодар :КубГАУ, 2024. - 82 с.
29. Горбунов А. Н., Кабанов И. Д., Кравцов А. В., Редько И. Я. Теоретические основы электротехники. Челябинск, 1998. 490 с.
30. Данилин В. В. Исследование эффективности частотно-импульсного питания озонаторов / В. В. Данилин, Н. В. Жуков, М. П. Кокурин // «Высоковольтная и преобраз. техн. и системы управл. электротехн. и энергет. оборудованием»: сб. науч. тр. / Гос. Науч. Центр Рос. Федерации. Всесоюз. Электротехнический институт. - Москва, 1996. -с. 21-27.
31. Демьянников А. И. Оптимизация кинетической схемы модели синтеза озона в кислороде / А. И. Демьянников, А. А. Дементьев // *Журнал физической химии*. - 1994. - Т. 30. - вып. 11. - С. 578-584.
32. Джакония И. С. Изучение влияния сроков хранения семян, обработанных в градиентном магнитном поле на урожай гибридной кукурузы / И. С. Джакония, Ш. А. Задгинидзе, Ф. А. Дедуль // Всесоюз. науч. конференция: тез. // КСХИ. - Киров, 1989. - С. 109.
33. Дмитриев А. М. Опыт использования магнитного поля и лазерного облучения для повышения качества посевного материала в хозяйствах Белоруссии / А. М. Дмитриев, В. С. Ветров, А.Р. Колин // «Применение низкоэнергетических физических факторов в биологии и сельском хозяйстве»: тез. / КСХИ. - Киров, 1989. - С. 14-15.

34. Дмитриев А. В., Шомов А. Н. Применение токов повышенной частоты в газоразрядной химии / А.В. Дмитриев, А.Н. Шомов // «Труды ВНИИТВЧ»: сб. науч. тр./ ВНИИТВЧ. – Воронеж, 1956. - с. 136-142.
35. Дмоховская Л. Ф., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С., Разевиг Д. В., Рябкова Е. Я. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976. 490 с.
36. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: учебник / Б.А. Доспехов. - М.: Агропромиздат, 1985. - 351 с.
37. Драганов Б. Х., Кузнецов А. В., Рудобашта С. П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. М., 1990. 463 с.
38. Евсеев Е. К. Эти активированные жидкости / Е.К. Евсеев // Техника и наука. - 1984. - №12. - С. 28-29.
39. Егорушкин В. Е., Колб В. Л., Цеплович Б. Л. Основы теплотехники и теплоснабжение сельскохозяйственных предприятий. М.: Колос, 1972. 456 с.
40. Елецкий А.В. Газовый разряд / А.В. Елецкий. - М.: Знание, 1981. - 630с.
41. Емельянов Ю. М. Структура и механизм разряда процесса образования озона в озонаторах / Ю.М. Емельянов, В.Г. Бабаян, З.И. Аршулы // Журнал физической химии. - 1968. -Т. 42. - вып. 11. - С. 2936-2939.
42. Емельянов Ю. М. Электрическая теория озонаторов / Ю.М. Емельянов, Ю.В. Филиппов // Журнал физической химии. - 1959. - Т. 33. - вып. 5. - С. 1042-1046.
43. Емельянов Ю. М. Электросинтез озона / Ю.М. Емельянов, Ю.В. Филиппов // Журнал физической химии. - 1962. - Т. 33. - вып. 9. - С. 2263-2267.
44. Еремин Е. И. Элементы газовой электрохимии / Е.И. Еремин. - М.: Изд-во МГУ, 1968. - 212 с.
45. Жидаческий Л. И. Предпосевное облучение семян с.-х. культур в градиентном магнитном поле. / Л.И. Жидаческий, В.Г. Ботнарюк // Всесоюз.

научн. конф. «Применение низкоэнергетических физических факторов в биологии и сельском хозяйстве»: тез. // КСХИ. - Киров, 1989. - С. 102-104.

46. Зелепухин В. Д. Дегазированная вода как основной стимулятор роста растений / В.Д. Зелепухин // Вестник с.-х. наук Казахстана. - 1975. - №5. - С. 28-32.

47. Иванов А. В. Энергосберегающий генератор озона для сельского хозяйства / А. В. Иванов, С. М. Доценко // Сельский механизатор. – 2023. – № 5. – С. 36-37.

48. Калашников С. Г. Электричество: учебник / С.Г. Калашников. - М.: 1964. - 668 с.

49. Калентьев Е. И. Предварительное исследование кормовой пригодности хлореллы в эксперименте на белых крысах. Проблемы создания замкнутых экологических систем, "Наука", 1967 г. с. 67-72.

50. Калинина В. П. Математическая статистика: учебник / В.П. Калинина, В.Ф. Панкин. - М.: Высш. шк., 1994. - 336 с.

51. Кирко И. М. Математическая модель барьерного электрического озонатора в гидродинамическом приближении / И.М. Кирко, В.А. Кузнецов // «Физические проблемы технологии»: сб. науч. тр. – ПГТУ. - Пермь, 1999. - №2. - С. 25-31.

52. Клюка В.И. Опыт применения градиентного магнитного поля для предпосевной обработки семян сои / В.И. Клюка // «Труды КубГАУ»: сб. науч. тр.// КубГАУ. - Краснодар, 1995. - Вып. 344. - С. 80-87.

53. Кожевникова Н. Ф. Обоснование и исследование процесса предпосевной обработки семян в электрическом поле переменного тока / Н.Ф. Кожевникова // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. - 1971. - №3. - С. 22-25.

54. Кожинов В. Ф., Кожинов И. В. Озонирование воды / В.Ф. Кожинов, И.В. Кожинов. - М.: Стройиздат, 1974. - 160 с.

55. Ксенз Н. В. Анализ электрических и магнитных воздействий на семена / Н.В. Ксенз, С.В. Качеишвили // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. - 2000. - №6. - С. 8-9.
56. Ксенз Н. В. Использование электроозонированного воздуха в сельскохозяйственном производстве / Н.В. Ксенз., И.Ф. Бородин // Техника в сел. хоз.-ве.-1993.-№3.-С. 13-14.
57. Ксенз Н. В. Исследование процесса генерирования озона при коронном разряде / Н.В. Ксенз, О.В. Рудик // «Механизация и электрификация производственных процессов в животноводстве»: сб. научных трудов // ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1969. - С. 115-119.
58. Ксенз Н. В. Оптимизация коронных озонаторов / Н.В. Ксенз // сб. науч. тр. - ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1987.- 164 с.
59. Ксенз Н. В. Предпосевная обработка семян с.х. культур электроактивированной водой / Н.В. Ксенз, М.Н. Симонов, Е.Н. Симонова // АЧГАА. - зерноград, 1998.- 6 с. - деп. в ВИНТИ 22.06.98.
60. Ксенз Н. В. Электроозонирование воздушной среды животноводческих помещений: метод. рекомендации / Н.В. Ксенз // ВНИПТИМЭСХ. - зерноград, 1991.- 171 с.
61. Кудрявцев И. Ф., Карасенко В. А. Электрический нагрев и электротехнология. Москва: Из-во «Колос», 1975. 384 с.
62. Куперман Ф. М. Основные закономерности морфологической изменчивости растений: лекция из курса «Биология развития растений» / Ф.М. Куперман. - М.: Из-во. АН СССР, 1962.
63. Кутис С. Д. Влияние предпосевной обработки семян с.-х. культур в магнитном и электрическом полях на посевные качества семенного материала и урожай / С.Д. Кутис, Т.Л. Кутис // Всесоюз. научн. конф. «Применение низкоэнергетических физических факторов в биологии и сельском хозяйстве»: тез. / КСХИ. - Киров, 1989. - С. 112-118.

64. Кутис С. Д. Обработка семян сельскохозяйственных культур в градиентном магнитном поле / С.Д. Кутис, М.Ю. Гуськова, Е.З. Гак // Науч.-тех. бюл. по агрономической физике. - 1989. - № 5. - С. 50-53.
65. Кушкин П. И. Предпосевная обработка семян магнитным полем / П. И. Кушкин // Научные труды Львовского СХИ. - 1979. -Т. 79.-С. 90-99.
66. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Перевод с англ. - под редакцией Н.А. Капцова. - М-Л.: Гостехиздат, 1950. – 672 с.
67. Леб Л. Статическая электризация / Л. Леб. - М.: Госэнергоиздат, 1963.- 405с.
68. Лунин В. В. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. - М.: Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.
69. Лучкин С. П. Озонирование воздушной среды животноводческих помещений в целях их санации / С.П. Лучкин // «Механизация и электрификация производственных процессов в животноводстве»: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1986. - с. 69-76.
70. Лучкин С.П. Расчет выхода озона при коронном разряде / С.П. Лучкин // «Механизация и электрификация производственных процессов в животноводстве»: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1987. – 164 с.
71. Лысов В. Н. Просо / В.Н. Лысов. - Л.: Колос, 1968. – 244 с.
72. Ляхнович Я. П. Рост и накопление пигментов у хлореллы на среде Тамия с добавлением картофельного сока. - Ботаника. Минск. 1967, вып. 9, с. 70-74.
73. Матвеев Н. А. Промышленное производство озона и типы озонаторных установок / Н.А. Матвеев. – Минск. – Будивельник, 1965. - С. 19-27.
74. Матус В. К. Структурно-модифицирующее воздействие озона на плазматические мембраны / В.К. Матус, А.М. Мельникова, Н.М. Окунь // «Вести Академии Наук Белорусской ССР»: сб. науч. тр./ АН БССР. – Минск, 1980. - №1. - С. 258-261.

75. Мелешко Г. И., Красотченко Л. М. Условия углеродного питания хлореллы в интенсивной культуре. - В кн.: Проблемы космической биологии. М.: Наука, 1965, т. 4, с. 676-682.
76. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. - М.: Минсельхозпром России, 1998. – 220 с.
77. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. – М.: Информэлектро, 1994. - 141 с.
78. Музафаров А. М., Таубаев Т. Т., Якубов Х. Ф. Массовое культивирование протококковых водорослей в установках под открытым небом. В кн.: Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Изд-во "ФАН" УзССР, Ташкент, 1972 г., с.3-55.
79. Музафаров А. М., Милоградова Е. И. Массовое культивирование хлореллы. Ташкент: УЗИНТИ, 1965, с. 3-16.
80. Музафаров А. М., Таубаев Т. Т. Культивирование и применение микроводорослей. Ташкент: Фан, 1984. 185 с.
81. Музафаров А. М., Таубаев Т. Т. Хлорелла (методы массового культивирования и применения). Ташкент: Фан, 1974. 11с.
82. Наумов Г. Ф. Биологическая стимуляция семян подсолнечника как прием улучшения их посевных качеств и урожайности свойств / Г.Ф. Наумов, Л.Ф. Носова // Селекция и семеноводство. - 1984. – Вып. 56 – С.89-93.
83. Нормов Д. А. Анализ энергетических процессов в системах электроозонирования применяемых в АПК / Д.А. Нормов, Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко // «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе»: сб. науч. тр. / СГАУ. – Ставрополь, 2005. - С.144-146.

84. Нормов Д. А. Озон в отраслях АПК / Д.А. Нормов // «Научное обеспечение агропромышленного комплекса»: сб. науч. тр. / КубГАУ. - Краснодар, 2002. - С. 86-89.

85. Нормов Д. А. Осушающие и бактерицидные свойства озона / Д.А. Нормов // «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе»: сб. науч. тр. / СГАУ. - Ставрополь, 2003. - С. 219-220.

86. Нормов Д. А. Электроозонаторы для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур. Краснодар, 2008.

87. Нормов Д. А., Шуськин Е. И. Технологический процесс электроозонной обработки хлореллы // Информационно-управляющие системы в АПК. Мат. Международного научно-практического семинара, посвященного 90-летию профессора В.Т. Сергованцева, Москва: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2012.- С. 32-34.

88. Нормов Д. А., Шуськин Е. И. Электроозонные технологии в рыбном хозяйстве как способ дезинвазии прудов и стимулирования роста планктона // Научный журнал «Университет. Наука. Идеи и решения» КубГАУ, выпуск №2, 2010. – С. 156-158.

89. Нормов Д. А., Шуськин Е. И., Лиснер И. А. Катализ ростовых процессов зеленой хлореллы электроозонированием // Научное обеспечение АПК. Мат. 5 Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных Краснодар: КубГАУ, 2011. - С. 442-444.

90. Nur M. Development of Ozone Technology Rice Storage Systems (OTRISS) for quality improvement of rice production / M. Nur, E. Kusdiyantini, W. Wuryanti [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 622, No. 1. – P. 012029.

91. Оськин С. В. Применение электрического поля для предпосевной обработки семян: теория и практика : монография / С. В. Оськин. – Краснодар :КубГАУ, 2021. – 185 с.

92. Пат. 2198136 Российская Федерация, МПК С01 В13/11 Озонатор / В.К. Андрейчук, Д.А. Нормов, С.В. Вербицкая, А.А. Шевченко, Д.А. Овсянников, В.В. Лисицин / заявитель и патентообладатель КубГАУ. - №2001129272/09, заявл. 30.10.01; опубл. 10.02.03, Бюл. № 26. – 3 с.

93. Пат. 2248111 Российская Федерация, МПК А01 С1/00 Способ предпосевной обработки с.х. культур / Д.А. Нормов, С.В. Оськин, А.А. Шевченко, Е.А. Сапрунова / заявитель и патентообладатель КубГАУ. - №2003123158/13; заявл. 22.07.03, опубл. 20.03.05, Бюл. № 23. – 3 с.

94. Пат. 2253608 Российская Федерация, МПК С01 В13/11 Озонатор / Д.А. Нормов, А.В. Снитко, А.А. Шевченко, А.А. Петухов, Т.А. Нормова; заявитель и патентообладатель КубГАУ. - №2004111058 заявл. 12.04.04; опубл. 10.06.05. Бюл. №21. - 3 с.

95. Пат. 2475456 Российская Федерация, МПК С02F 1/461. Установка для электролиза водно-солевых растворов / Д.А. Нормов, Н.Н. Курзин, А.С. Оськин, Н.М. Симонов, Е.И. Шуськин / заявитель и патентообладатель КубГАУ. - № 2011106629, заявл. 22.02.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. – 5 с.

96. Пат. 2478283 Российская Федерация, МПК А01Н 1/04, А01G 13/00, А01С 1/00. Способ обеззараживания гороха в условиях защищённого грунта для селекционных целей / Д.А. Нормов, Е.А. Федоренко, И.А. Лиснер, Т.Н. Полутина, Т.А. Нормова, Е.И. Шуськин / заявитель и патентообладатель КубГАУ. - № 2011132895, заявл. 04.08.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. – 5 с.

97. Пат. 2479186 Российская Федерация, МПК А01С 1/00, А01N 25/02, А01N 31/00. Способ стимулирования роста гороха в условиях защищённого грунта для селекционных целей / Д.А. Нормов, Н.Н. Курзин, Е.А. Федоренко, В.А. Нормов, Е.И. Шуськин / заявитель и патентообладатель КубГАУ. - № 2011132900, заявл. 04.08.2011; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11. – 5 с.

98. Пат. 2497749 Российская Федерация, МПК С01 В13/11. Способ определения конструктивных параметров электроозонатора / Д.А. Нормов, Е.А. Федоренко, Т.Н. Полутина, В.А. Нормов, Е.И. Шуськин / заявитель и патентообладатель КубГАУ. - № 2012142079/05, заявл. 02.10.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 5 с.

99. Пат. 6433003 Япония, МКИ4 С01 В13/11. Озонатор / МасатокийОсимбуми, Мацусита рейки. - № 62-186251; заявл. 24.07.87; опубл. 02.02.89, Кокай токкёкохо. сер. 3(1). - 3 с.

100. Пат. 6451304 Япония, МКИ4 С01 В13/11. Озонатор / Бабе Сейдзи, Симон К.К. - № 62-205067; заявл. 20.08.87; опубл. 27.02.89, Кокай токкёкохо. сер. 3(1). - 7 с.

101. Пандиселвам Р. Озон как новая перспективная технология для обеззараживания продуктов водного происхождения / Р. Пандиселвам, С. Субхашини, П. С. БануПрия [и др.] // *Ozone: Science&Engineering*. – 2020. – Т. 42, № 3. – С. 237-249.

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

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

104. Пожидаев Д.В., Нормов Д.А., Добровольский Д.А. Определение факторов, влияющих на производительность электроозонатора // *Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием / под общ. ред. Трушкина В.А.* — 2019. — С. 161-162.

105. Пожидаев Д.В., Нормов Д.А., Добровольский Д.А. Повышение эффективности пластинчатых электроозонаторов // *Актуальные проблемы*

энергетики АПК: материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием / под общ. ред. Трушкина В.А. — 2019. — С. 163-165.

106. Пожидаев Д., Нормов Д., Чеснюк Е., Шевченко А., Нормова Т., Гольдман Р., Бохинц Т., Трдан С. Влияет ли обработка семян кукурузы озоном на их всхожесть и энергию прорастания? // Acta Agriculturae Slovenica. — 2019. — Т. 114, № 2. — С. 251-258

107. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2026г оди на плановый период 2027 и 2028 годов: разработано Минэкономразвития России. –Текст: электронный// Официальный сайт Министерства экономического развития РФ.

108. Рахимов А. Р., Якубов Х. Ф. О некоторых биохимических свойствах штаммов хлореллы и сценедесмуса, выращенных в различных условиях питания. - В кн.: Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1978, 271 с.

109. Резчиков В. Г. Влияние озона на прорастание семян гороха и облепихи / В.Г. Резчиков, А.В. Чурмасов, А.А. Гаврилова // «Техника в сельском хозяйстве»: сб. науч. тр. / ЧГАУ. - Челябинск, 1998. - С. 14-17.

110. Резчиков В. Г. Воздействие озона на биологические объекты / В.Г. Резчиков // «Молодые исследователи сельскохозяйственной науки»: сб. науч. тр. / ЧГАУ. - Челябинск, 1997.- С. 12-14.

111. Роберте Д. А. Основы защиты растений / Д.А. Роберте; Пер. с англ. А.С. Саломе; Под ред. Ю. П. Фадеева. - М.: Колос, 1981. - 254 с.

112. Роль температуры и фитогормонов в нарушении покоя семян / Под ред. М. Г. Николаевой. - Л.: Наука, 1981. - 160 с.

113. Савельев В. А. Использование физических методов для улучшения качества посевного материала / В.А. Савельев // Всесоюз. научн. конф. «Применение низкоэнергетических физических факторов в биологии и сельском хозяйстве»: тез. / КСХИ. - Киров, 1989. - С. 56-59.

114. Савин В. Н. Действие ионизирующего излучения на целостный растительный организм / В.Н. Савин. - М.: Атомиздат, 1981. - С. 57-64.
115. Сальникова М. Я. Хлорелла - новый вид корма. М., 1977. 87 с.
116. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. М.: МГУ, 1989. - 176 с.
117. Самойлович В. Г., Попович М. П., Емельянов Ю. М., Филиппов Ю. В. Напряжение горения в кислородно-озонных смесях // Журнал физической химии. - 1966. - Т.40, Вып.3. - С.531-535.
118. Сапрунова Е. А. Электроозонная обработка семян и вегетирующих растений / Е. А. Сапрунова, Д. А. Нормов, А. А. Шевченко. – Краснодар :КубГАУ, 2020. – 158 с.
119. Свириденко Е.А. Сравнительный анализ эффективности использования различных физических методов предпосевной обработки семян кукурузы / Е.А. Свириденко, Р.Н. Ляхова, Г.П. Стародубцева // «Науч. тр. ССХИ»: сб. науч. тр. / ССХИ. – Ставрополь, 1980. - Вып. 43. - Т.6. - С. 33-35.
120. Селяметов Р. А. Рекомендации по применению витаминных кормов в животноводстве Узбекистана. Ташкент: УзНИИ, 1968, 14 с.
121. Селяметов Р. А., Якубов Х. Ф. К изучению витаминного состава хлореллы и сценедесмуса. - В кн.: Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1971, с. 59-60.
122. Серегина М. Т. Эффективность обработки семян зерновых культур в градиентном магнитном поле / М.Т. Серегина // III Всесоюз. конф. по с.-х. радиологии: тез. / Обнинск, 1990. - Т.4. - С. 88-90.
123. Сечян Л.К. Эффективность предпосевной обработки семян зерновых культур электромагнитными и некоторыми другими физическими факторами в условиях юга Украины / Л.К. Сечян, Н.А. Киндук, О.К. Слюсаренко // Науч.-техн. бюлл. Всесоюз. селекционно-генетического института / ВСГИ. – Москва, 1985. - №2. - С. 40-44.

124. Соколова М.В. Влияние рода газа на образование озона и на характеристики разряда в промежутке с диэлектриком / М.В. Соколова, В.Г. Артамонов // МЭИ. - М.: Изд-во МЭИ, 1978. - Вып. 358 - с. 33-36.
125. Старик Д.Э. Как рассчитать эффективность инвестиций / Д.Э. Старик. – М.: Финстатинформ, 1996. - С. 93.
126. Стародубцева Г. П. Использование физических факторов для борьбы с болезнями сельскохозяйственных культур / Г.П. Стародубцева, Т.В. Подарева // Современные достижения биотехнологии - вклад в науку и практику XXI века: Материалы Всерос. конф. - Ставрополь, 1999. - С. 39.
127. Сторчевой В. Ф. Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля / В. Ф. Сторчевой, Ю. А. Судник, А. Н. Мануйленко // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 66-73.
128. Тарифы на электрическую энергию для прочих потребителей на 2026 год: Приказ Департамента государственного регулирования тарифов Краснодарского края от 15.12.2025 №44/2025-э.
129. Таубаев Т. Т., Нескубо П. М. Применение суспензии хлореллы при откорме крупного рогатого скота хлопчатниковыми кормами. В кн.: Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1971, с. 59-60.
130. Ткачев И. Ф. Хлорелла - биологический стимулятор роста животных // Вестник сельскохозяйственных наук, 1966, № 3, с. 81-86.
131. Ткачев И. Ф. Хлорелла - источник белка и витаминов. - Сельскохозяйственное производство Северного Кавказа и ЦЧО, 1965, № 4, с. 42.
132. Трифонова М. Ф. Физические факторы в растениеводстве / М.Ф. Трифонова, О.В. Бляндур, А.М. Соловьев. – М.: Колос, 1998. – 352 с.
133. Тюр А. А. Предпосевное электрическое стимулирование семян / А.А. Тюр, А.И. Желтоухов // Техника в сел. хоз-ве. - 1985. - №2. - С. 18-21.

134. Филиппов Ю. В. Влияние величины разрядного промежутка на электрические характеристики озонаторов / Ю.В. Филиппов, В.П. Вендилло // Журнал физической химии. - 1959. - Т.33, Вып. 10. - С. 2359-2364.
135. Филиппов Ю. В. Влияние переноса реагирующих веществ вдоль потока на кинетику реакции в потоке // Кинетика и катализ. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - С.13-22.
136. Филиппов Ю. В. Оптимальные условия синтеза озона в электрическом разряде. В кн.: Озонирование воды и выбор рационального типа озонаторной станции. Киев: Будивельник, 1965. - с.27-37.
137. Филиппов Ю. В. Химические реакции в тихом электрическом разряде / Ю.В. Филиппов, Ю.В. Емельянов // «Современные проблемы физической химии»: сб. науч. тр./ МГУ. - Москва, 1968. - С. 77-148.
138. Филиппов Ю. В. Электросинтез озона. - Вестник МГУ. Химия. 1959. №4. с.153-186.
139. Филиппов Ю.В. Электросинтез озона / Ю.В. Филиппов // Вестник МГУ. Сер. химия. - 1959. - №5. - С. 204-209.
140. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.В. Электрическая теория озонаторов // Журнал физической химии. - 1957. - Т.31, Вып. 4. - С.896-906.
141. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.В. Электрический ток в озонаторах // Журнал физической химии. - 1958. - Т.32, Вып. 12. - С.2817-2822.
142. Филиппов Ю.В., Кобозев Н.И. Влияние температуры электродов озонатора на синтез озона // Журнал физической химии. - 1961. - Т. 38, вып. 7. - С.2078-2082.
143. Чоудхари Р. Комплексный обзор от прошлого к настоящему и будущему праймирования семян перекисью водорода и сероводородом в условиях засухи, температуры, УФ и озонового стресса / Р. Чоудхари, В. Д. Раджпут, Г. Гходаке [и др.] // PlantandSoil. – 2024. – Vol. 500, No. 1-2. – P. 351-373.

144. Шевченко А. А. Механизм воздействия озона на кукурузу и другие биологические объекты с.-х. / А.А. Шевченко, Е.А. Сапрунова // «Электротехнологии и электрооборудование в с.-х. производстве»: сб. науч. тр. / АЧГАА. – зерноград, 2004. – С. 30-32.

145. Шевченко А. А. Применение озона для обработки зерновых культур / А.А. Шевченко // IV региональная научно-практическая конференция молодых ученых «Научное обеспечение агропромышленного комплекса»: тез. / КубГАУ. – Краснодар, 2002. – С. 273-275.

146. Шевченко А.А. Параметры электроозонирования для предпосевной обработки семян кукурузы: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Шевченко; КубГАУ. - Краснодар, 2005. - 137 с.

147. Шуськин Е. И. Экологические подходы к оценке санитарного состояния рыбохозяйственных водоёмов // Научно-технический и информационно-аналитический журнал «Чрезвычайные ситуации». Краснодар: КСЭИ, 2010. - С. 175-178.

148. Щербаков А. А. Влияние озонирования на посевные качества семян зерновых культур / А. А. Щербаков // Вестник аграрной науки Дона. – 2023. – Т. 16, № 4(60). – С. 49-56.

149. El-Mashad H. M. Development of a Low-Cost Ozone (O<sub>3</sub>) Generator for Research and Education in Agricultural and Food Applications / H. M. El-Mashad, M. A. I. Al-Saadi, S. A. Al-Harbi [et al.] // Processes. – 2025. – Vol. 13, No. 11. – P. 3637.

150. Foy C.D. Ozone tolerance related to flavonoid glycoside genes in soybean / C.D. Foy, E.H. Lee // J. Plant Nutr. - 1995. - №4. - P. 634-647.



# СЕРТИФИКАТ

выдан

*Болотину Владимиру Леонидовичу*

**Университет Вернадского**

за участие в Международной научно-практической конференции

*"Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации"*

Проректор по  
стратегическому  
развитию



**А.И. Тихонов**

г.Балашиха, 20 мая 2025 года



«УТВЕРЖДАЮ»  
ИП Трифонов А.В.



«04» августа 2025 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы «Параметры электроозонатора для обработки жидких сред на примере выращивания микроводоросли» выполненной в Российском государственном аграрном университете – МСХА имени К. А. Тимирязева, ИМЭ им. В. П. Горячкина в 2025 г., внедрены в ИП «Трифонов» г. Краснодар.

1. Вид внедренных результатов: Электротехнология электроозонной стимуляции роста и развития микроводоросли хлорелла, электроозонатор для барботации жидких сред.

2. Характеристика масштабов внедрения: биореактор объемом 200 литров, выращено готовой продукции более 2500 л.

3. форма внедрения: опытно-производственная.

Руководитель НИР

  
Д.А.Нормов

Исполнитель НИР

  
В.Л.Болотин