

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
И.Т. ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи



Азарян Александр Ашотович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ НАВОЗНЫХ СТОКОВ
СВИНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ**

Специальность: 4.3.2. – Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Шевченко Андрей Андреевич

Краснодар – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Предпосылки для разработки новых и модернизации существующих систем очистки навозных стоков в животноводстве	11
1.2 Существующие способы дезинфекции навозных стоков животноводческих комплексов	14
1.3 Дезинфицирующие и бактерицидные свойства озона	18
1.4 Анализ исследований процесса обеззараживания жидкой фракции навозных стоков электроозонированием.....	25
1.5 Выводы, цель и задачи исследования	27
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД СВИНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	30
2.1 Электрофизические процессы при генерации озона в барьерном разряде.....	30
2.2 Элементы теории массопередачи при смешивании озона в камере обработки навозных стоков.....	44
2.3 Абсорбация газовой фазы в распыленной жидкой среде	49
2.4 Абсорбация газовой фазы в распыленной жидкой среде при наличие электрического поля.....	56
2.5 Выводы	71
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА И ВЛИЯНИЕ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ВРЕДНОСНЫЕ	

МИКРООРГАНИЗМЫ СТОЧНЫХ ВОД СВИНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	73
3.1 Экспериментальное исследование влияния конструкционных параметров разрядного устройства на электрические параметры генератора озона	73
3.2 Описание экспериментальной электротехнологической установки для изучения влияния озона на вредоносные микроорганизмы сточных вод	81
3.3 Исследование влияния озоновоздушной смеси на выживаемость стафилококков, находящихся в жидкой фракции навозных стоков	88
3.4 Исследование влияния озоновоздушной смеси на выживаемость колиформов, находящихся в жидкой фракции навозных стоков	101
3.5 Выводы.....	112
4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ.....	114
4.1 Разработка системы автоматизации электротехнологической установки для комплексной технологии очистки навозных стоков.....	114
4.2 Техничко-экономическое обоснование применения комплексной технологии очистки навозных стоков	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132
ПРИЛОЖЕНИЯ	149

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Патент РФ № 2688610 «Способ очистки навозных стоков»	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Производственные испытания станции очистки навозных стоков	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Акт внедрения	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспечение продовольственной безопасности России напрямую связано с увеличением производства животноводческой продукции, достичь которого можно за счет увеличения поголовья сельскохозяйственных животных (крупного рогатого скота, свиней, птицы и т. д.) и повышения интенсивности производства. Увеличение поголовья неизбежно приводит и к росту отходов животноводческих ферм: на сегодняшний день в Российской Федерации ежегодно образуется более 250 млн тонн навоза, навозных стоков и птичьего помета. Одним из технологически устоявшихся способов их утилизации является непосредственное внесение в почву в качестве удобрений, но учитывая тот факт, что помимо питательных веществ навоз и навозные стоки содержат значительное количество вредоносных биологических организмов и химических элементов, возникает проблема интенсивного загрязнения плодородных почв. По этой причине навозные стоки по критериям органического, микробиологического и биогенного загрязнения отнесены к особо опасным с экологической точки зрения. Таким образом, решая проблему продовольственной безопасности страны, государство получает потенциально опасную угрозу экологического характера, нарастание которой неизбежно. По данным ученых ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» на сегодняшний день в России подверглось загрязнению за счет внесения отходов животноводческих комплексов более 2 млн гектар плодородных почв. К основным загрязнителям, которые содержатся в навозе и навозных стоках, относятся: аммиак, фосфор, термотолерантные колиформные бактерии, яйца гельминтов и др.

Ученые разных стран исследуют разнообразные способы очистки навозных стоков, но все подходы остаются узконаправленными и не комплексными, что мешает достичь стабильного результата, соответствующего нормативам и требованиям.

Среди существующих методов можно выделить:

1. Применение лагун – самый распространенный способ, при котором стоки выдерживают 1–3 года для естественного обеззараживания. Однако это требует значительных объемов накопителей, что противоречит политике РФ по наращиванию поголовья скота.

2. Химическая обработка (формалин, известь и др.) эффективна лишь при небольших объемах и точной дозировке, но контроль за составом стоков часто отсутствует, что ведет к перерасходу реагентов.

3. Биохимическая очистка (аэротенки) – технологически сложна и дорога (до 30 % стоимости комплекса), при этом даже трехступенчатая аэрация за 5 суток не всегда обеспечивает достаточно глубокую очистку.

4. Применение биологических прудов с аквакультурой – простой метод, но требует создания искусственных водоемов на территории животноводческого комплекса, что не всегда возможно.

5. Физические методы показывают положительные результаты, однако данные по их эффективности все еще противоречивы из-за недостаточной проработки темы. Среди возможных решений выделяются физические методы на основе воздействия электрической природы: применение озоноздушных смесей, электрогидравлический эффект, пропускание электрического тока для нагрева сточных вод, применение ультрафиолетового излучения и т. д.

На наш взгляд, перспективным на сегодняшний день является применение электроозонных технологий совместно с предварительной механической очисткой стоков от крупных примесей, что позволяет обеззаразить сток без вреда экологии и образования дополнительных токсичных химических соединений.

Работа выполнена в рамках национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности».

Степень разработанности темы. Вопросами обеззараживания навозных стоков в сельском хозяйстве занимались Н.В. Родионова, Н.В. Лимаренко, Т.А. Сторожук, Д.А. Нормов, А.Л. Кулакова, И.А. Потапенко, Р.А. Амерханов, А.В. Богдан.

Рассмотрением обеззараживания стоков крупного рогатого скота ультразвуком занималась Т.А. Сторожук. Большой вклад в обеззараживание жидких сред при помощи электротехнологии внес Л.А. Юткин.

Использованию электроозонных технологий в сельском хозяйстве посвящали свои работы: Ю.А. Судник, Е.А. Денисенко, В.Ф. Сторчевой, И.А. Пожидаев, Н.В. Ксенз, А.А. Шевченко, Д.А. Нормов, А.Л. Кулакова, И.А. Потапенко, Р.А. Амерханов, А.В. Богдан, С.В. Оськин, А.П. Волошин, П.В. Гуляев, А.В. Чернышов и др.

Но, несмотря на все вышесказанное, имеется потребность в дополнительных исследованиях по использованию электроозонных технологий для обеззараживания стоков свиноводческих комплексов с разработкой соответствующего технологического оборудования.

Рабочая гипотеза. Применение озоновоздушной смеси для обеззараживания жидкой фракции навозных стоков позволит снизить количество вредоносных микроорганизмов и сократить время созревания перед утилизацией их в качестве удобрений.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности обеззараживания навозных стоков свиноводческих ферм за счет обоснования параметров и режимов работы электротехнологической установки.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи исследования:**

1. Определить влияние конструкционных параметров газоразрядного блока генератора озона на его электрические характеристики.
2. Разработать математическую модель взаимодействия озоновоздушной смеси с жидкой фракцией навозных стоков в камере обработки.
3. Экспериментально подтвердить теоретически полученные расчетные соотношения влияния конструкционных параметров газоразрядного блока генератора озона на его электрические характеристики.
4. Определить технологически эффективные режимы и параметры процесса озонирования для обеззараживания жидкой фракции навозных стоков.

5. Выполнить технико-экономическое обоснование применения электроозонирования для обеззараживания навозных стоков свиноводческих комплексов.

Объектом исследования является технология обеззараживания навозных стоков свиноводческих предприятий с применением генератора озона пластинчатого типа.

Предмет исследования – электрофизические параметры обработки навозных стоков свиноводческих комплексов; зависимости влияния конструкционных параметров газоразрядного блока на электрические параметры генератора озона пластинчатого типа.

Методы исследования. В работе использованы основы теории электротехники, термодинамики, техники высоких напряжений, теория планирования эксперимента, методы теории вероятности и математической статистики, программное обеспечение STATISTICA, Microsoft Office, Excel, MathCAD Professional.

Научную новизну работы составляют:

1. Зависимости, позволяющие оценить влияние конструкционных параметров газоразрядного блока генератора озона на его электрические параметры.

2. Математическая модель взаимодействия озоновоздушной смеси с жидкой фракцией навозных стоков.

3. Методика обеззараживания жидкой фракции навозных стоков озоновоздушной смесью.

Практическую значимость работы представляют:

1. Режимы и параметры электроозонирования для подавления патогенной микрофлоры, содержащейся в жидкой фракции навозных стоков свиноводческих предприятий.

2. Характеристики, описывающие влияние конструкционных параметров газоразрядного блока на электрические параметры генератора озона.

3. Алгоритм функционирования системы автоматического управления технологического процесса обеззараживания навозных стоков свиноводческих комплексов.

На защиту выносятся следующие основные положения работы:

1. Зависимости, позволяющие определить наиболее рациональное сочетание конструкционных параметров газоразрядного блока для получения максимального коэффициента мощности генератора озона.

2. Математическая модель, позволяющая определить массопередачу озона жидкой фракции навозных стоков, а также абсорбцию озона в камере обработки под воздействием электрического поля.

3. Параметры озонирования для угнетения патогенной микрофлоры, содержащейся в жидкой фракции навозных стоков свиноводческих комплексов.

Реализация результатов исследования. Данные, представленные в работе, подтверждены производственным испытанием, которые проводились на базе свиноводческого комплекса ООО «Новые аграрные технологии» с поголовьем 12,5 тысяч, что позволило запустить выпуск предлагаемого оборудования в серийное производство заводом агропромышленного оборудования ООО «Производственный комплекс «Инноватех», расположенного в Приморско-Ахтарском районе Краснодарского края.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на ежегодных научно-практических конференциях преподавателей и молодых ученых по итогам НИР в ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (Краснодар, 2014–2025), а также конференциях различного уровня: Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Саратов, 2014); Международной научно-практической конференции «Проблемы развития современной науки» (Уфа, 2015); Всероссийской молодежной научно-практической конференции Национального исследовательского Томского политехнического университета «Фундаментальные основы современных аграрных технологий и техники» (Томск, 2015); Международной научно-практической конференции «Научные открытия в эпоху глобализации» (Саратов,

2016); региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов, магистрантов и преподавателей «Актуальные вопросы экономики и технологического развития отраслей народного хозяйства» (Краснодар, 2016); Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко (Краснодар, 2017); ежегодных научных конференциях ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ: «Научное обеспечение агропромышленного комплекса» (Краснодар, 2017, 2019); Юбилейной научно-патриотической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ (Краснодар, 2022).

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Предпосылки для разработки новых и модернизации существующих систем очистки навозных стоков в животноводстве

В целях безопасности продовольственного обеспечения в РФ, начиная с 2012 г., стартовало активное импортозамещение. Одним из следствий этой работы стало увеличение производства продуктов мяса и птицы. На рисунке 1.1 представлен график развития реализации скота и птицы на убой (в живом весе) с 2015 по 2024 гг. Из графика следует, что за последние 10 лет реализация увеличилась на 25 %.

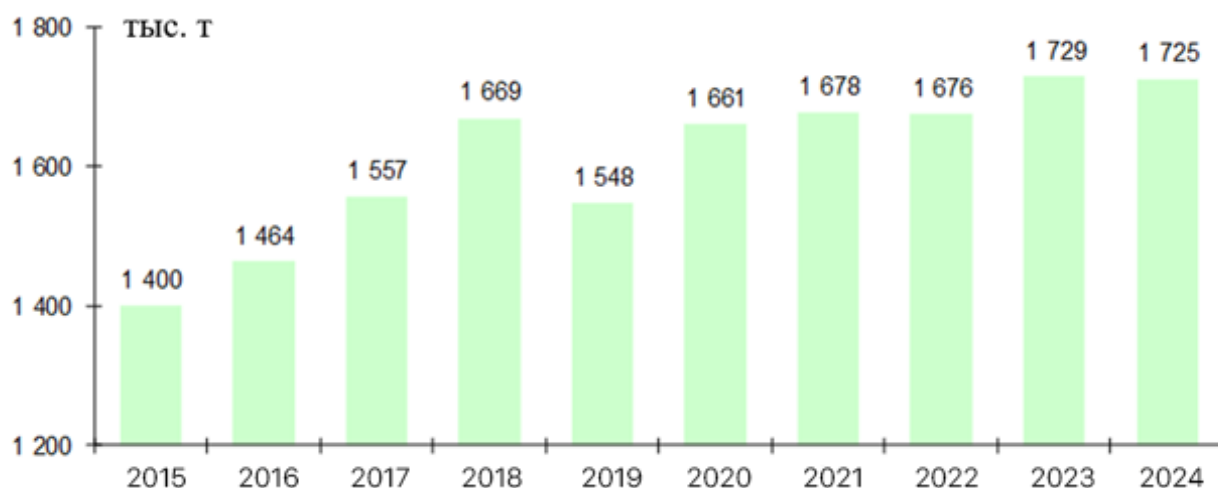


Рисунок 1.1 – Статистика реализации скота и птицы на убой в живом весе животноводческими предприятиями Российской Федерации

Негативной стороной развития животноводства стало увеличение продуктов жизнедеятельности животных и птицы. По данным специалистов Всероссийского научно-исследовательского института органических удобрений и торфа на 2024 г. в стране насчитывается 46,5 млн голов свиней – это примерно 46 млн тонн навоза в год, навоз крупного рогатого скота – 217 млн тонн, птицы – 17 млн тонн, других животных – 6 млн тонн. Таким образом, ежегодно на животноводческих предприятиях образуется порядка 286 млн тонн навоза.

Для удаления отходов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных современные предприятия оснащаются системами удаления навоза и помета. Наиболее распространенной технологией очистки помещений от навоза является гидросмыв [45]. Данный метод очистки свиноводческих помещений характеризуется образованием большого количества сточных вод, которые содержат высокую концентрацию вредоносных микроорганизмов. Также сточные воды содержат высокую концентрацию органических загрязнений, таких как аммонийный азот, но наибольшую опасность для экологии составляют находящиеся в стоках патогенные микроорганизмы и яйца гельминтов [40–42]. Режимы водоотведения свиноводческих комплексов характеризуются высокой неравномерностью и напрямую зависят от вида выращиваемых животных. Основное содержание таких стоков составляет вода и экскременты, выделяемые животными. Характеристика экскрементов, выделяемых свиньями представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристика экскрементов, выделяемых свиньями

Животное	Количество отходов в сутки, кг	Влажность, %
Свиноматки с поросятами	15,9	90,2
Хряки	11,3	89,3
Свиноматки супоросные	10,1	91,4
Свиноматки холостые	8,8	90,9
Поросята отъемыши (масса до 30 кг)	2,3	86,3
Свиньи откормочные (масса до 40 кг)	3,6	86,2
Свиньи откормочные (масса в пределах 40 – 80 кг)	5,1	87,0
Свиньи откормочные (масса свыше 80 кг)	6,7	87,5

Свиной навоз представляет собой высококонцентрированный экологически опасный отход, и его влияние на окружающую среду можно оценивать по нескольким критериям: органическому, микробиологическому и биогенному

загрязнению. В навозе содержится значительное количество органических веществ, таких как углерод, азот, фосфор и калий. Хотя эти элементы и являются питательными веществами для растений, но в избытке они могут привести к загрязнению водоемов и почвы.

При разложении органических веществ, содержащихся в навозе, выделяются газы, такие как метан и аммиак [10]. Это ведет к загрязнению воздуха и способствует парниковому эффекту. Свиной навоз, будучи высококонцентрированным экологически опасным отходом, требует осторожного обращения. Важно внедрять устойчивые практики, такие как компостирование и переработка, чтобы минимизировать его негативное воздействие на окружающую среду. Исследования в этой области могут помочь в разработке эффективных методов управления, которые будут безопасны как для экосистем, так и для здоровья человека [63–65].

Использование навоза для пополнения макро- и микроэлементов в почве играют большую роль в сельском хозяйстве, но несмотря на то, что навозные стоки свиноводческих комплексов богаты питательными веществами для почв, использовать их нельзя по причине высокой концентрации биогенных и органических веществ, паразитов и тяжелых металлов. Применение продуктов жизнедеятельности животных свиноводческого предприятия в качестве удобрения на регулярной основе неминуемо приведет к деградации почвы, нанесет вред экологии и повлечет за собой гибель растений, загрязнению подземных источников и водоемов [26]. Также стоит отметить, высокую вероятность загрязнения воздуха дурно пахнущей летучей органикой и распространения вредоносных микроорганизмов. Таким образом, можно сделать вывод, что важную роль в животноводческом производстве играют системы подготовки, хранения и внесения навоза в поля.

Самой большой ошибкой при строительстве и реконструкции животноводческих помещений – является выделение недостаточных площадей для хранения отходов, что чревато экологическими катастрофами. Навозные стоки

хранятся в централизованных лагунах от 8 до 12 месяцев и только потом используются в качестве удобрений [93, 117].

Таким образом, прежде чем появится возможность внесения навозных стоков в почву в качестве удобрения, необходимо стоки подвергнуть комплексной обработке, а применение и внедрение систем очистки и обеззараживания навозных стоков является актуальным вопросом, стоящим перед инженерными подразделениями сельскохозяйственных товаропроизводителей.

1.2 Существующие способы дезинфекции навозных стоков животноводческих комплексов

Целью обеззараживания навозных стоков является уничтожение патогенных микроорганизмов, содержащихся в них, и устранение опасности заражения окружающей среды этими вредоносными микроорганизмами при спуске их в водоемы и внесении в почву или закладке на длительное хранение. По мнению ряда исследователей современные методы очистки сточных вод животноводческих ферм (отстаивание в лагунах, биологическая очистка и т. д.) не позволяют полностью уничтожить патогенные микроорганизмы [86].

Сточные воды представляют собой сложную систему, в которой органические и минеральные загрязнители находятся в растворенном, коллоидном и нерастворенном состояниях [5]. На сегодняшний день более 80 % очистных сооружений канализаций во всем мире не работают, либо не обеспечивают необходимое качество очистки. Этому есть ряд причин, среди которых можно выделить: неспособность оборудования длительное время обеспечивать высокую надежность, прекращение биологической обработки в холодный период года, перебои подачи электричества. К указанному числу можно отнести все устаревшие очистные сооружения, в которых процесс осуществляется при помощи биологических фильтров.

Существует ряд сельскохозяйственных предприятий, которые являются источником сточных вод, характеризующихся наибольшим загрязнением. К ним

относятся мясокомбинаты, предприятия по утилизации, кожевенные заводы, животноводческие комплексы, биофабрики и прочее. Сточные воды этих предприятий содержат высокую концентрацию микроорганизмов и органических веществ [118–120]. Данные воды могут стать источником инфекционных и инвазионных заболеваний.

Биологические исследования показали, что в большинстве типов сточных вод содержится широкий спектр патогенных микроорганизмов. Рассмотрим основные группы патогенов [23]:

1. Бактерии.

Самыми распространенными являются *Escherichia coli*, *Salmonella spp*, *Campylobacter spp*, *Shigella spp*, *Vibrio cholerae*. Перечисленные микроорганизмы являются возбудителями таких заболеваний как кишечные инфекции, диареи, сальмонеллез, гастроэнтерит, шигеллез, лихорадки, холера.

2. Вирусы.

Среди вирусов сточных вод выделяют: норовирусы, гепатит А, ротавирусы. Перечисленные вирусы являются причиной таких заболеваний, как вспышки гастроэнтерита, острые воспаления печени, диарея

3. Паразиты.

Giardia lamblia, *Cryptosporidium spp*, *Entamoeba histolytica*. Паразиты, находящиеся в сточных водах, могут стать причиной амебиаза, криптоспоридоза, лямблиоза.

4. Грибы.

Candida spp. обычно не являются патогенными в сточных водах, но могут вызывать инфекции у людей с ослабленной иммунной системой.

5. Простейшие.

Acanthamoeba spp. амебы могут вызывать инфекции глаз и центральной нервной системы, особенно у людей с ослабленным иммунитетом.

Сточные воды могут содержать множество патогенных микроорганизмов, которые представляют опасность для здоровья человека и животных. Эти патогены

могут вызывать различные заболевания, передающиеся через воду, что делает важным эффективное обеспечение обеззараживания стоков.

Существующие методы обеззараживания сточных вод можно классифицировать следующим образом [81, 82]:

- Химические методы.
- Физические методы.
- Механические.
- Биологические методы.
- Комбинированные методы.

Химические методы характеризуются применением соединений хлора, также в качестве дезинфицирующего средства может выступать озон (O_3) и пероксид водорода (H_2O_2).

К физическим методам обработки стоков относятся: гидроудар, термическая обработка, электрофизические процессы, основанные на излучении и воздействии электрическим полем [6].

Механические методы очистки стоков могут включать флотацию, коагуляцию, фильтрацию и сорбцию, либо использоваться в комплексе.

Биологические методы включают в себя аэробное и анаэробное разложение и биофильтры. В таких системах микроорганизмы разлагают органические вещества в стоках.

Комбинированные методы очистки – это системы, включающие в себя несколько методов очистки [89, 90]. В качестве примера, комбинированная очистка стоков может осуществляться в несколько этапов, на первом происходит предварительная фильтрация, на втором – хлорирование, либо УФ-облучение. Общая эффективность обеззараживания повышается при комбинировании методов обработки, но при этом значительно возрастает стоимость оборудования и эксплуатационные характеристики.

Механическая очистка стоков часто применяется в качестве первого этапа при комплексном подходе очистки. Целью данного метода является удаление твердых загрязняющих веществ и крупных частиц из сточных вод. Для

осуществления механической очистки стоков используют системы активного осаждения, центрифуги, фильтры, флотаторы, отстойники, сетки и решетки.

Химическая очистка стоков необходима для достижения требуемого уровня очистки при наличии токсичных или трудноразлагаемых веществ. Данный метод основан на внедрении химических реагентов в обрабатываемую жидкость [66, 84, 85]. Наиболее популярным реагентом данного метода является хлор. Хлорирование получило широкое применение из-за своей простоты и дешевизны. Процесс обеззараживания осуществляют различными соединениями хлора. К преимуществам данного метода относятся значительный дезинфицирующий эффект при низком уровне эксплуатационных затрат. Но необходимо отметить, что использование хлора для обработки сточных вод не всегда показывает высокую эффективность при борьбе с вирусами [61, 67].

Несмотря на высокую эффективность, хлорирование не способно уничтожить некоторые патогенные микроорганизмы, такие как споровые бактерии. При использовании данного метода возникает высокий риск коррозии оборудования, а также образования побочных продуктов. При хлорировании могут образовываться такие вещества, как тригалометаны (ТГМ) и хлорорганические соединения, которые относятся к токсичным побочным продуктам [115, 116]. Таким образом хлорирование является важным методом очистки стоков, но его применение должно быть тщательно контролируемым, чтоб минимизировать риски с образованием токсинов и коррозии оборудования.

Менее популярными реагентами химической обработки являются бромамины и соединения йода. Первые применяются для водоподготовки бассейнов, а соединения йода получили свое применение на космических станциях. Однако широкое распространение методов ограничено их высокой стоимостью и возможностью образования токсичных производных веществ.

К эффективным методам, которые не сопровождаются образованием опасных и токсичных соединений, можно отнести ультрафиолетовое облучение (УФ-облучение). Облучение эффективно справляется с уничтожением большинства микроорганизмов, присутствующих в водной среде. Метод

УФ-обеззараживания основывается на прямом взаимодействии лучей с микроорганизмами и разрушением их клеточной структуры. Это приводит к разрушению молекул ДНК и повреждению оболочек клеток, что, в свою очередь, вызывает их мгновенную гибель. Таким образом, УФ-облучение представляет собой эффективный и безопасный метод дезинфекции сточных вод [110–113].

Как уже упоминалось ранее к химическому методу обработки относят озонирование. Применение озона для обеззараживания сточных вод получило широкое распространение. Положительным свойством данного реагента в сравнении с хлором является более высокое бактерицидное, вирулицидное и спороцидное свойство [7]. Он эффективно разрушает клеточные оболочки микроорганизмов, что приводит к их гибели. Высокие окислительные свойства озона позволяют образовывать минеральные соединения, вступая в реакцию с органическими веществами. Следовательно, применение озонных технологий является эффективным методом для обеззараживания стоков, однако он имеет свои определенные особенности. Во-первых, озон является нестабильным газом и быстро разлагается, что требует тщательного контроля за его концентрацией и временем воздействия. Во-вторых, для генерации озона необходимы специальные установки, что может увеличить первоначальные затраты на оборудование [69–73]. Также необходимо учитывать, что озон может реагировать с некоторыми веществами, образуя побочные продукты, которые могут быть токсичными. Несмотря на то, что озонирование является эффективным методом обеззараживания, его применение требует внимательного изучения и учета всех факторов, влияющих на эффективность и безопасность процесса.

1.3 Дезинфицирующие и бактерицидные свойства озона

В ходе исследований было принято решение использовать озон в качестве химического агента для обработки, поскольку в соответствии со ст. 49 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Об охране окружающей среды», запрещено применение токсичных химических препаратов,

которые не подвергаются естественному распаду и могут нанести долгосрочный вред экосистеме. Озон, являясь высокоэффективным и безопасным окислителем, полностью разлагается до кислорода и не оставляет токсичных остатков, что делает его оптимальным выбором с точки зрения эффективности обработки и экологической безопасности.

Озон обладает высокими бактерицидными свойствами, что позволяет использовать его для дезинфекции воды, воздуха и различных поверхностей. Механизм действия заключается в окислении клеточных стенок, разрушении ДНК и окислении органических веществ. Озон проникает в клеточные стенки микроорганизмов и вызывает их окисление, что приводит к нарушению структуры оболочки и гибели клетки. Попадая внутрь клетки, озон также взаимодействует с ДНК, что приводит к мутации, нарушению репликации и инаktivации [27, 31].

Эффективность применения озона в качестве бактерицидного реагента заключается в широком спектре действия [94, 95]. Озон эффективен против различных микроорганизмов, включая бактерии, вирусы, грибы и споры. Его бактерицидные свойства позволяют уничтожать даже устойчивые к другим методам дезинфекции патогены. Также эффективность применения озона при обработке стоков заключается в быстродействии. Озон действует быстро, обеспечивая дезинфекцию в течение нескольких минут [1].

При рассмотрении преимуществ озона перед другими дезинфицирующими средствами, первым делом необходимо выделить отсутствие токсичных остатков [16, 28]. Озон является безопасным для окружающей среды, так как не оставляет токсичные остатки после своего распада, чего нельзя сказать о хлоре. Вторым большим преимуществом озона является то, что его не нужно хранить. Озон производится и расходуется на месте, не вызывая потребности хранить токсичные реагенты.

К недостаткам данного способа обработки можно отнести нестабильность озона и его быстрое разложение. Также стоит отметить, что эффективность обработки может снижаться при увеличении загрязнителей в обрабатываемой жидкости.

Проведенный литературный обзор позволил сделать вывод, что бактерицидные свойства озона делают его мощным инструментом для дезинфекции, особенно в системах водоснабжения и водоотведения [30]. Однако стоит учитывать его особенности и ограничения при выборе методов дезинфекции.

Несмотря на наличие публикаций, посвященных применению озона, его антибактериальные свойства все еще остаются недостаточно изученными.

В связи с этим нами было принято решение провести ряд экспериментальных исследований, направленных на определение параметров озонвоздушного воздействия на бактерицидную обсемененность учебных аудиторий [98–101].

Экспериментальная оценка эффективности работы установки озонирования воздуха по степени снижения общей микробной обсемененности была проведена сектором микробиологических исследований в сертифицированной лаборатории Научно-исследовательского института прикладной и экспериментальной экологии.

Место проведения – учебная аудитория факультета энергетики №214.

Метод исследования – седиментационный.

Среда – мясопептонный агар.

Режим культивации – 24 часа при температуре 37 °С.

Результаты проведенного экспериментального исследования представлены в таблице 1.2.

Анализ полученных результатов позволил подтвердить эффективность использования установки озонирования воздуха для снижения общей микробной обсемененности воздушной среды учебной аудитории. Из экспериментальных данных видно, что обработка учебной аудитории озонвоздушной смесью в течение 15 минут позволила снизить микробную обсемененность до нулевого значения [2].

В аналогичном экспериментальном исследовании, проведенном в производственных условиях, оценивалось влияние озона на микробный фон свинарника-репродуктора в присутствии животных. В день исследования в свинарнике-рекуператоре находилось 35 подсосных свиноматок с поросятами,

всего 397 голов. Исследование проводили на СТФ №1 ПЗ «им. В.И. Чапаева» Динского района.

Таблица 1.2 – Экспериментальная оценка эффективности работы установки озонирования воздуха по степени снижения общей микробной обсемененности (А – количество колоний на агаре чашки Петри; Х – количество микробов в 1 м³)

№ п/п	Место контроля	Время Экспозиции мин.	Значение ОМЧ до Обработки (КОЕ), А	Значение ОМЧ до Обработки (КОЕ), Х	Значение ОМЧ после обработки (КОЕ), А	Значение ОМЧ после обработки (КОЕ), Х
1	1 (окно)	5	11	1467	4	534
2	2(дверь)	5	4	534	2	266
3	1(окно)	10	16	2134	3	400
4	2(дверь)	10	6	800	2	266
5	1(окно)	15	20	2667	2	266
6	2(дверь)	15	17	2267	0	0

Озоновоздушную смесь получали с помощью восьми портативных электроозонаторов барьерного типа, разработанных в Кубанском ГАУ. Контроль изменения микробного фона воздуха помещения проводили седиментационным чашечным методом Коха [114]. В качестве питательной среды использовали агар.

В ходе исследований установлено, что общее микробное число (ОМЧ) в одном кубическом метре воздуха свинарника в 5,5 раза превышает норму (60 тысяч микробных клеток/1 м³) и составляет 337 тысяч микробных клеток.

На начальном этапе работы генератора озона (через 10 минут после включения) был зафиксирован рост ОМЧ на 12 %, предположительно рост искомого показателя связан с увеличением интенсивности работы вентиляционной системы и взаимодействием озоновоздушной смеси с газовой средой внутри помещения, а в особенности с сероводородом и аммиаком. В последующем фиксировалось постепенное снижение ОМЧ: через 20 минут после включения – 278 тыс. м. к./м³; через 30 минут – 192 тыс. м. к./м³; через 40 минут – 166 тыс. м. к./м³; через 50 минут – 158 тыс. м. к./м³; через 1 час – 154 тыс. м. к./м³. Таким образом использование озоновоздушной смеси с концентрацией озона 1-3 мг/м³ не позволило снизить микробный фон в помещении свинарника до рекомендованного

уровня в 60000 микробных клеток на 1 м³. Следующее измерение провели через два часа непрерывной подачи озонозвоздушной смеси внутрь помещения, но за этот период снижение уровня ОМЧ составило 27000 микробных клеток на 1 м³, а общий микробный фон составил – 127 тыс. микробных клеток на 1 м³.

Так как производственные испытания не привели к достижению искомого результата нами было принято решение о проведении исследований в лабораторных условиях для определения режимов озонозвоздушного воздействия на тест-бактерии с целью их полного уничтожения.

Экспериментальные исследования проводили на базе кафедры эпизоотологии и вирусологии Кубанского ГАУ. Поставленной задачей являлось определение необходимого сочетания концентрации озона и времени воздействия до полного уничтожения таких бактерий как: *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus aureus*.

Озонозвоздушную смесь получали с помощью пластинчатого генератора озона, оснащенного блоком управления с функцией регулирования мощности, что позволило регулировать генерацию озона в широком диапазоне [96].

Последовательность проведения опыта заключалась в следующем – перед началом испытаний в чашки Петри помещали 0,1 мл микробной суспензии, которая равномерно распределялась по поверхности питательной среды. Каждая доза микробной суспензии содержала 1000 клеток. Далее чашки Петри с микроорганизмами помещались в специализированную камеру, в которую впоследствии подавали озонозвоздушную смесь с тремя уровнями концентрации озона – 6, 12 и 25 мг/ м³. По истечению следующих промежутков времени воздействия озона – 7, 15, 30, 60 и 120 минут из камеры извлекалось по три чашки Петри и перемещались в термостат, в котором в течении 24 часов при постоянной температуре 37 °С происходило размножение колоний микроорганизмов. В качестве контроля использовали чашки Петри, не подвергавшиеся воздействию озонозвоздушной смеси. Данные, полученные в ходе экспериментального исследования, представили в табличной форме (таблица 1.3).

Уменьшение концентрации до 12 и 6 мг/м³ даже при самом длительном воздействии (120 минут) приводит к менее значимым результатам по снижению общего микробного фона. Однако полученные результаты свидетельствуют о практически линейной зависимости выживаемости микроорганизмов от уровней концентрации при времени воздействия от 15 до 30 минут. Прежде всего это связано с гибелью наиболее восприимчивых к озону микроорганизмов.

Также важной особенностью, выявленной в ходе экспериментального исследования, является интенсивная гибель клеток бактерий в первые 30 минут воздействия даже при минимальном уровне концентрации озона 6 мг/м³, данный факт наглядно продемонстрирован на графической зависимости (рисунок 1.2). Однако дальнейшее увеличение экспозиции не приводит к значительному эффекту инактивации бактерий, что, по нашему мнению, связано с адаптацией бактерий к губительному воздействию озоновоздушной смеси из-за усиления антиоксидантной защиты [74–78].

Необходимо отметить, что все бактерии, участвующие в экспериментальном исследовании, имеют хорошую устойчивость к воздействию активных форм кислорода, но, несмотря на это, их устойчивость к воздействию озона была неодинаковой. Наиболее выраженный дезинфицирующий эффект от воздействия озона наблюдался у грамположительных бактерий, таких как стафилококк и сенная палочка, в тоже время грамотрицательные микроорганизмы (кишечная и синегнойная палочки) обладали более высокой устойчивостью к бактерицидному действию озоновоздушной смеси (рисунок 1.2).

Различные уровни устойчивости бактерий к воздействию озона прежде всего связаны со структурой их клеточной оболочки. Так у грамположительных бактерий клеточная стенка состоит из мурамилпептида и тейхоевой кислоты, тогда как у грамотрицательных бактерий помимо перечисленных элементов добавляются липополисахариды. С большой долей вероятности можно предположить, что наличие липополисахаридов в клеточной структуре грамотрицательных бактерий является значительным препятствием для проникновения озона внутрь клеточной оболочки с ее последующим разрушением [34].

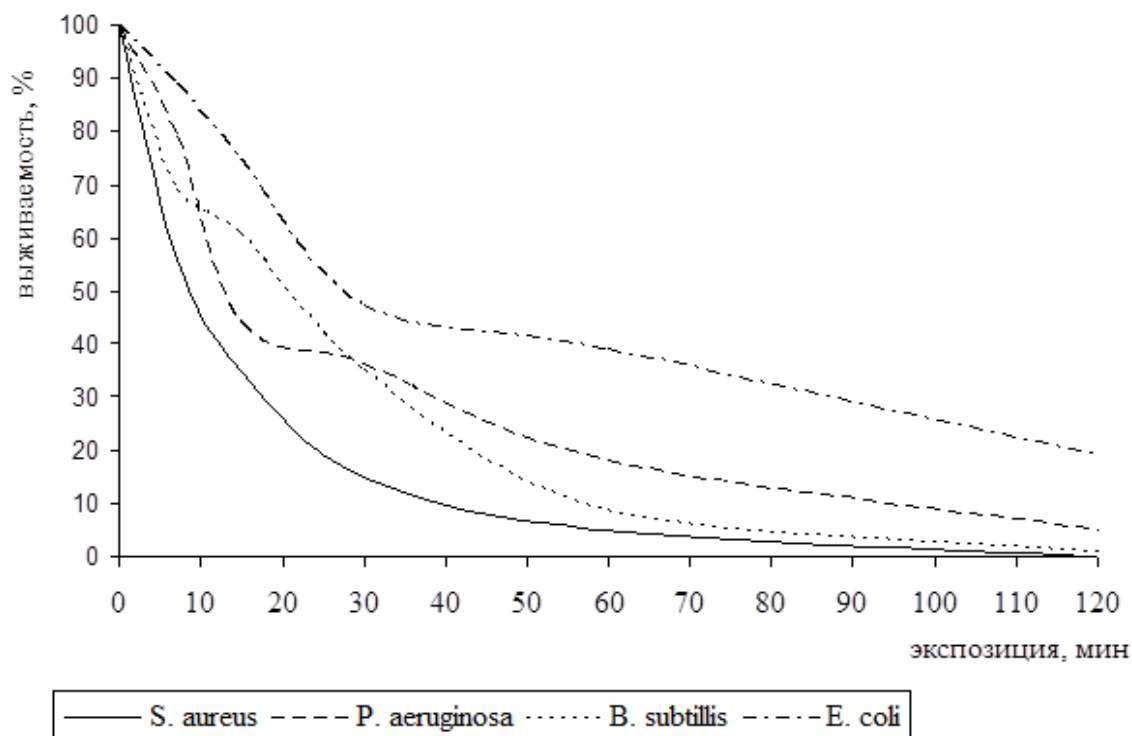


Рисунок 1.2 – Антибактериальное действие озона при концентрации 6 мг/ м³ и различной длительности воздействия на исследуемые тест бактерии

Анализ данных, полученных в ходе экспериментального исследования, показывает положительный эффект применения озона для уничтожения патогенной микрофлоры как при высоких уровнях концентрации, так и при более низких концентрациях, но при более продолжительном времени воздействия на микроорганизмы.

Это подтверждает высокую эффективность озона в качестве дезинфицирующего агента и открывает широкие возможности для его использования в различных сферах, включая медицину и санитарно-гигиенические практики.

1.4 Анализ исследований процесса обеззараживания жидкой фракции навозных стоков электроозонированием

Озонирование является распространенным методом химической обработки сточных вод. Применение аллотропной модификации кислорода O₃ было впервые

эффективно внедрено во Франции и используется уже с 1887 г. для водоподготовки. В настоящее время известно использование озонных технологий в США, Японии, а также для обеззараживания питьевой воды в элитных жилищных комплексах города Москва.

Химические свойства озона наиболее эффективно использовать на заключительном этапе обеззараживания сточных вод, это позволяет избавиться от токсичных соединений и добиться высокой степени очистки. Однако стоит отметить, что для борьбы с вирусами необходимы более высокие дозы озона, чем для обработки питьевой воды [53–60]. Таким образом целесообразно проводить предварительную очистку, чтоб избавить стоки от взвешенных частиц. К предварительной очистке можно отнести фильтрацию, флотацию и различные физико-химические способы очистки. Предварительная очистка позволяет снизить количество взвешенных частиц до 3–5 мг/дм³ и биохимической потребности в кислороде (БПК) до 10 мг/дм³ [21, 22, 43].

Среди трудностей при использовании озона можно выделить нестабильность озона, снижение эффективности в сильно загрязненной воде, стоимость, сложный контроль концентрации, образование побочных продуктов, необходимость в предварительной обработке. Под нестабильностью озона мы понимаем короткий срок жизни. Озон быстро разлагается, что требует его немедленного использования после генерации. Это может создать сложности в дезинфекции, если требуется длительное время обработки [14, 15].

В сильно загрязненных навозных стоках наличие органических и неорганических веществ может снижать эффективность озона [19]. Загрязнители могут поглощать часть озона, уменьшая его доступность для взаимодействия с патогенами.

Высокая стоимость технологии складывается из затрат на генераторы озона и сопутствующее оборудование. Также стоит отметить, что при эксплуатации затраты на электроэнергию могут быть значительными.

Образование побочных продуктов. Потенциально побочные продукты могут образовываться при реакции озона с веществами в навозных стоках. К таким

потенциально токсичным веществам относят альдегиды и другие органические соединения [20].

Также стоит отметить, что для достижения высокого дезинфицирующего эффекта, необходимо применять методы предварительной очистки такие, как механическая или физическая обработка стоков для удаления крупных частиц и улучшения качества воды, что увеличивает затраты и время обработки.

Процесс озонирования начинается с взаимодействия молекул озона с водой на границе раздела газовой и жидкой фаз. Это приводит к растворению части молекул озона в воде, в то время как другая часть остается на поверхности газовых пузырьков [29, 35]. Далее озон взаимодействует с загрязняющими веществами сточных вод, что происходит по нескольким реакционным механизмам:

1. **Прямое окисление** – включает окислительно-восстановительные реакции, в результате которых неорганические и органические вещества окисляются, образуя продукты с большей степенью окисления. Например, сульфиды окисляются до сульфатов, а железо – с II до III степени окисления [107–109].
2. **Непрямое окисление** – происходит с участием активных радикалов гидроксильной группы, образующихся при взаимодействии озона с молекулами воды. Скорость этого процесса зависит от степени разложения озона и содержания загрязняющих веществ.
3. **Озонолиз** – механизм, при котором происходит разрыв двойных и тройных связей между атомами углерода в органических веществах с образованием нестабильных озонидов.
4. **Озонокатализ** – увеличение окислительного действия атомов кислорода, присутствующих в озоновоздушной смеси, что усиливает эффективность обработки сточных вод [37].

1.5 Выводы, цель и задачи исследования

Обзор литературных источников показал, что интенсификация животноводства в Российской Федерации, привела к ухудшению экологического

состояния окружающей среды вблизи животноводческих комплексов. В большинстве случаев ухудшение экологических показателей происходит из-за не надлежащего обращения с отходами жизнедеятельности животных. Также выявлены проблемы, связанные с устареванием, недостатком или отсутствием систем, позволяющих осуществлять очистку навозных стоков.

Для определения эффективности использования того или иного способа очистки навозных стоков нами изучены научные труды российских и зарубежных авторов. Проанализировав которые можно сделать вывод о том, что существующие на данный момент технологии очистки навозных стоков имеют ряд недостатков, которые не позволяют в короткие сроки осуществить очистку стоков животноводческих предприятий до надлежащего уровня. В связи с этим, нами предлагается использовать комплекс мероприятий для очистки навозных стоков, одним из которых является электроозонирование, способствующее дезинфекции жидкой фракции навозных стоков.

В связи с тем, что данные различных исследователей относительно эффективности применения озono-воздушной смеси для дезинфекции в животноводстве были противоречивыми, нами было принято решение о проведении собственного исследования. Его результаты подтвердили эффективность использования озonoвоздушной смеси в области уничтожения санитарно-значимых бактерий и микроорганизмов, которые могут содержаться в навозных стоках.

Опираясь на анализ литературных источников и результаты, полученные в ходе поискового эксперимента, были сформулированы цель и задачи исследования диссертационной работы.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности обеззараживания навозных стоков свиноводческих ферм за счет обоснования параметров и режимов работы электротехнологической установки.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи исследования:**

1. Определить влияние конструкционных параметров газоразрядного блока генератора озона на его электрические характеристики.

2. Разработать математическую модель взаимодействия озоновоздушной смеси с жидкой фракцией навозных стоков в камере обработки.

3. Экспериментально подтвердить теоретически полученные расчетные соотношения влияния конструкционных параметров газоразрядного блока генератора озона на его электрические характеристики.

4. Определить технологически эффективные режимы и параметры процесса озонирования для обеззараживания жидкой фракции навозных стоков.

5. Выполнить технико-экономическое обоснование применения электроозонирования для обеззараживания навозных стоков свиноводческих комплексов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД СВИНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

2.1 Электрофизические процессы при генерации озона в барьерном разряде

В настоящее время наиболее популярным способом получения озона является его синтез с помощью электрического разряда. Проведенные исследования показали, что наиболее устойчивым к условиям окружающей среды является синтез озона в барьерном разряде. Рассмотрев процессы, протекающие в генераторе озона установлено, что количество синтезированного озона напрямую зависит от количества свободных электронов (высокой энергии) в газоразрядном промежутке и их эффективной длины пробега.

Число свободных электронов в газоразрядном промежутке определяется напряженностью электрического поля на поверхности диэлектрических барьеров и зависит от объема ионизируемого газа в камере. Следовательно, увеличение напряженности электрического поля будет способствовать росту числа высокоэнергетических электронов до определенного уровня, который будет соответствовать режиму насыщения по току. Режим насыщения обусловлен неизменной интенсивностью ионизации, то есть все образовавшиеся, в единицу времени, электроны достигают противоположного электрода, прежде чем произойдет процесс рекомбинации. Таким образом, дальнейшее увеличение напряженности электрического поля повлечет рост энергетических затрат на получение озона без роста производительности озонатора.

Рассмотрим процессы, протекающие в газоразрядном промежутке более детально. Подача высокого потенциала на электроды вызывает появление напряженности электрического поля, что стимулирует процесс ионизации газа. Высвобожденные электроны устремляются к электроду с положительным потенциалом формируя лавину, при этом плотность заряда головки лавины

значительно выше, чем у ее основания. Данный процесс сопровождается характерным ультрафиолетовым свечением, характеризующим совокупность каналов, проводящих электрический разряд. Такое свечение равномерно распределяется по всему объему газоразрядной камеры, что говорит о равномерности ионизационных процессов и протеканию поверхностного разряда. Использование данного разряда не позволяет получать значительные концентрации озона, что подтверждается экспериментальными данными, полученными Ю.В. Филипповым и Ю.В. Емельяновым. Помимо этого, определено влияние материала диэлектрика, а, следовательно, и его удельного сопротивления, на растекание разряда по поверхности барьера. На основании научных изысканий рекомендовано использовать в качестве диэлектрических барьеров пластинчатого озонатора материалы, удельное сопротивление которых не превышает 10^{14} Ом/м.

Постепенное увеличение разности потенциалов на электродах газоразрядной камеры стимулирует рост числа высвобождаемых электронов. При достижении критического числа электронов внутри газоразрядной камеры формируются стримеры, данный процесс называли зажиганием разряда. Условием формирования стримера является равенство напряженностей основного электрического поля (E_2) и поля, формируемого лавиной электронов (E_n). Данное равенство достижимо при условии образования критической массы электронов (примерно 10^8), которая зависит от коэффициента ударной ионизации (α^*) и длины лавины (x_k), которая ограничивается шириной газоразрядного промежутка, так как лавина распространяется по кратчайшему пути между электродами (перпендикуляр к поверхности диэлектрического барьера). При этом количество озона, полученное за счет одного стримера постоянно при постоянстве подаваемого напряжения.

Еще одним параметром, характеризующим барьерный разряд является ток. До момента зажигания разряда величина тока зависит только от плотности носителей заряда (электронов) и равномерности их распределения по поверхности диэлектрического барьера. Этот процесс обусловлен тем, что подвижность электронов на много выше подвижности ионов. Также необходимо отметить, что процесс образования ионов (до зажигания разряда) зависит от интенсивности

естественного излучения, поэтому с увеличением напряжения не наблюдается значительного увеличения ионов, следовательно, рост тока не значителен (процесс насыщения), так как его величина будет зависеть от числа пар противоположно заряженных частиц, число которых в определенном объеме ограничено.

При достижении напряжения зажигания происходит пробой газовой среды, сопровождающийся резким увеличением ее электропроводности и тока. Это вызвано интенсивными столкновениями электронов с молекулами газа, приводящими к лавинообразному росту числа свободных зарядов. Известно, что барьерный разряд протекает в однородном электрическом поле если ширина газоразрядного промежутка лежит в диапазоне от 0,5 мм до 3 мм, а также процесс перекрытия (возникновение электрической дуги между соседними электродами) не возникает при напряжении, не превышающем в 1,7 раза уровень напряжения зажигания разряда.

На основании вышеизложенного можно сказать, что для получения максимальной производительности генератора озона необходимо определить наилучшее сочетание конструктивных параметров генерирующего блока (толщина диэлектрического барьера и ширина воздушного промежутка) и возникающей в нем напряженности электрического поля. Это позволит повысить эффективность использования озонатора с точки зрения энергетических затрат, то есть определить наиболее эффективное сочетание активной, реактивной и полной мощности, что в свою очередь повлияет на рост КПД электроозонатора.

Основным фактором, связывающим конструктивные параметры разрядного устройства и создаваемую в нем напряженность электрического поля, является емкость газоразрядного блока. Эквивалентную схему замещения, которого до зажигания разряда можно представить следующим образом (рисунок 2.1):

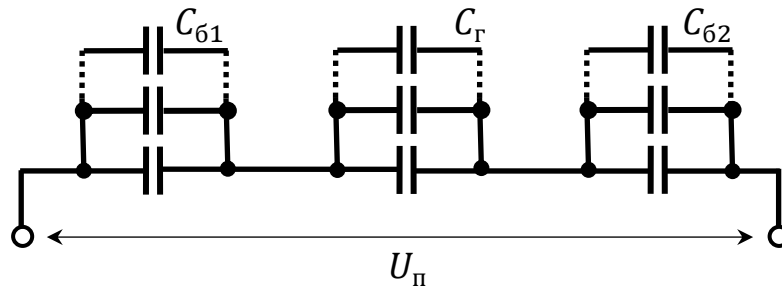


Рисунок 2.1 – Схема замещения газоразрядного блока до зажигания разряда

До зажигания разряда генерирующий блок представляет собой последовательное соединение диэлектрических барьеров и газоразрядных промежутков, каждый из которых обладает собственной емкостью. Суммарная емкость устройства в этом случае может быть представлена в следующем виде:

$$C_{р.б.} = \frac{C_{б1} \cdot C_{б2} + C_{б1} \cdot C_{г} + C_{б2} \cdot C_{г}}{C_{б1} \cdot C_{б2} \cdot C_{г}} \quad (2.1)$$

где $C_{р.б.}$ – суммарная емкость разрядного блока генератора озона;

$C_{б1}$ и $C_{б2}$ – емкость диэлектрических барьеров разрядного промежутка;

$C_{г}$ – емкость газоразрядного промежутка.

Диэлектрические барьеры не только формируют емкостную составляющую газоразрядного блока, но и предотвращают появление дугового разряда между электродами, при этом в зависимости от приложенного напряжения рекомендуется минимально допустимое расстояние от края электрода до края диэлектрика от 20 до 70 мм. Такая компоновка токопроводящей и диэлектрической части минимизирует вероятность появления дугового разряда. Определить максимально допустимый уровень напряжения, приложенного к электродам без формирования дугового разряда, можно по формуле, учитывающей конструкционные и физические особенности диэлектрика.

$$U_{дуг.р.} = 74,8 \left(\frac{b}{\varepsilon} \right)^{0,45} \quad (2.2)$$

где $U_{дуг.р.}$ – уровень напряжения при котором возникает дуговой разряд, кВ;

b – ширина диэлектрического барьера, мм;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала барьера.

Подводя итог вышеизложенного, можно сказать, что рабочая область напряжений электродвигателя лежит в диапазоне от уровня достаточного для зажигания барьерного разряда до уровня перекрытия (возникновение электрической дуги). Для данного режима характерно резкое снижение сопротивления разрядного устройства за счет появления микроразрядов, через которые носители заряда достигают противоположного барьера. Эти изменения можно обосновать появлением активного сопротивления плазмы в газоразрядном промежутке, в этом случае схема замещения примет вид:

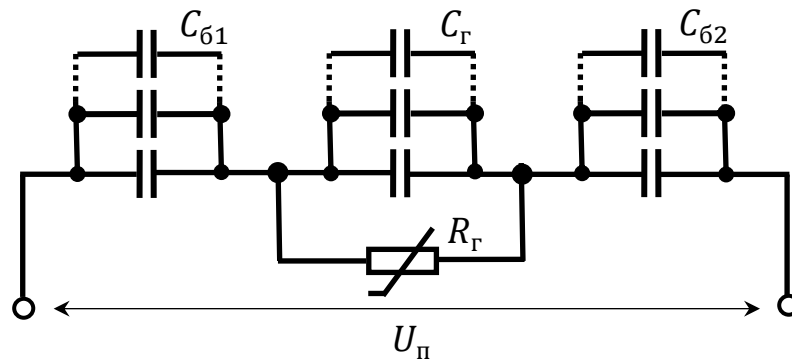


Рисунок 2.2 – Схема замещения газоразрядного блока после зажигания разряда

Активное сопротивление газоразрядного промежутка ($R_{г}$), шунтирующее емкость ($C_{г}$), является изменяющимся и не линейным, так его характеристика зависит от количества переносимых через воздушный зазор носителей заряда, а их количество, изменяется в зависимости от приложенного питающего напряжения ($U_{п}$). Учитывая появление активной составляющей сопротивления, после зажигания барьерного разряда, рассчитывать полное сопротивление газоразрядного промежутка необходимо по формуле:

$$z_{г} = \sqrt{\frac{R_{г}^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{г}^2}{R_{г}^2 + \omega^2 \cdot C_{г}^2}} \quad (2.3)$$

Наличие барьерного разряда невозможно без активной составляющей, следовательно, можно сделать вывод о том, что активное сопротивление газоразрядного промежутка, при горящем разряде, всегда больше нуля, таким образом выражение (2.3) можно представить следующим образом:

$$z_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\omega^2 \cdot C_{\Gamma}^2}{1 + \frac{\omega^2 \cdot C_{\Gamma}^2}{R_{\Gamma}^2}}} \quad (2.4)$$

Из формулы (2.4) вытекает следующая закономерность – снижение активной составляющей сопротивления газоразрядного промежутка (R_{Γ}), после зажигания барьерного разряда с последующим увеличением питающего напряжения, приводит к снижению полного сопротивления (z_{Γ}), следовательно, при горящем разряде емкостной составляющей (C_{Γ}) можно пренебречь. В то же время, горящий разряд не оказывает влияние на емкостную составляющую диэлектрических барьеров (C_{δ}), емкостное сопротивление которой многократно превышает активное сопротивление газоразрядного промежутка (R_{Γ}), таким образом сопротивление разрядного блока генератора озона в основном будет зависеть от емкости диэлектрических барьеров.

Анализ представленных взаимосвязей позволяет сделать вывод о том, что ВАХ генератора озона будет состоять из двух областей: 1 – до зажигания разряда; 2 – после зажигания разряда, данный вывод подтверждается экспериментальными исследованиями, приведенными в 3 главе диссертационной работы. Также установлена тесная взаимосвязь между конструкционными и электрофизическими параметрами пластинчатого генератора озона, требующая более детальной проработки с точки зрения подбора наиболее эффективного их сочетания.

Для этого рассмотрим электротехнические процессы, протекающие в пластинчатом генераторе озона. До момента зажигания разряда электрический ток, протекающий через разрядное устройство, будет зависеть от суммарной емкости, которая определяется по формуле (2.1) и питающего напряжения:

$$I_1 = U_{\Pi} \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_{\text{р.б.}} = U_{\Pi} \cdot \omega \cdot C_{\text{р.б.}}, \quad (2.5)$$

где f – частота питающего сигнала, Гц;

ω – угловая частота, 314 рад/с при стандартной частоте 50 Гц.

При увеличении питающего напряжения растет количество носителей заряда, и разряд зажигается, когда напряжение достигнет уровня, достаточного для

перемещения всех электронов к соседнему барьеру. В этот момент величина тока определяется по соответствующей формуле:

$$I_{з.р.} = U_{з.р.} \cdot \omega \cdot C_{\Gamma}, \quad (2.6)$$

где $I_{з.р.}$ – ток зажигания разряда, мА;

$U_{з.р.}$ – напряжение зажигания разряда, кВ.

При горящем разряде прирост тока обусловлен приростом питающего напряжения и емкостью барьеров, так как емкость газоразрядного промежутка будет стремиться к нулю и ею можно пренебречь. Данную взаимосвязь можно записать в виде выражения:

$$\Delta I_{з.р.} = (U_{\Pi} - U_{з.р.}) \cdot \omega \cdot C_{\delta}. \quad (2.7)$$

Следовательно, ток при горящем разряде определяется из уравнения:

$$I_2 = U_{\Pi} \cdot \omega \cdot C_{р.б.} + (U_{\Pi} - U_{з.р.}) \cdot \omega \cdot C_{\delta}. \quad (2.8)$$

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что в момент зажигания разряда будет соблюдаться следующее соотношение:

$$U_{з.р.} \cdot \omega \cdot C_{р.б.} = U_{\Gamma} \cdot \omega \cdot C_{\Gamma}, \quad (2.9)$$

где U_{Γ} – падение напряжения на газоразрядном промежутке, кВ.

Преобразовав выражение (2.9), определим напряжение зажигания разряда:

$$U_{з.р.} = U_{\Gamma} \frac{C_{\Gamma}}{C_{р.б.}}. \quad (2.10)$$

Используя уравнения (2.1) и (2.10), уточним выражение для определения тока после зажигания барьерного разряда:

$$I_2 = (U_{\Pi} - U_{\Gamma}) \cdot \omega \cdot C_{\delta}. \quad (2.11)$$

Опираясь на проведенные исследования, составим уравнения для определения мгновенного значения тока до и после зажигания разряда:

$$i_1 = \frac{d}{dt} (U_m \cdot C_{р.б.} \cdot \sin(\omega t)) = U_m \cdot C_{р.б.} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t), \quad (2.12)$$

$$i_2 = \frac{d}{dt} [C_{\delta} \cdot (U_m \cdot \sin(\omega t) - U_{з.р.})] = U_m \cdot C_{\delta} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t). \quad (2.13)$$

Проведя сравнительный анализ схем замещения и уравнений токов до и после зажигания разряда, можно заключить, что барьерная емкость всегда больше

емкости разрядного блока. Данный вывод также подтверждается резким ростом тока после зажигания разряда, что и наблюдается на практике.

Следующим шагом составим уравнение для определения активной мощности пластинчатого генератора озона. В общем виде активная мощность для синусоидальных цепей определяется из уравнения:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} iud(\omega t). \quad (2.14)$$

Диаграмма тока через разрядный блок генератора озона имеет разрывы в моменты зажигания и затухания разряда. Поскольку положительный и отрицательный полупериоды тока и напряжения симметричны, интегрирование можно выполнять только для половины периода. Время разрыва функции рассчитывается по соответствующей формуле:

$$\omega t = \sin^{-1} \left[1 - \frac{2U_{\Gamma} \cdot (C_{\text{р.б.}} + C_{\text{б}})}{U_{\Pi} \cdot C_{\text{б}}} \right]. \quad (2.15)$$

Используя уравнения мгновенных значений тока до и после зажигания разряда (2.12), (2.13) и уравнение (2.15), составим уравнение для определения активной мощности генератора озона:

$$P = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/2}^{\omega t} U_m^2 \cdot \sin(\omega t) \cdot \omega \cdot C_{\text{р.б.}} \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) + \quad (2.16)$$

$$+ \frac{1}{\pi} \int_{\omega t}^{3\pi/2} U_m^2 \cdot \sin(\omega t) \cdot \omega \cdot C_{\text{б}} \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t),$$

где $\pi/2$ и $3\pi/2$ – точки разрыва функции.

Проведем математические преобразования выражения (2.16) и получим уравнения для определения активной мощности генератора озона:

$$P = \frac{2}{\pi} \omega \cdot U_{\Gamma} \cdot ((U_{\Pi} - U_{\Gamma}) \cdot C_{\text{б}} - U_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma}). \quad (2.17)$$

Преобразуем уравнение 2.17 в соответствии с уравнениями (2.9) и (2.11), получим:

$$P = \frac{2}{\pi} U_{\Gamma} (I_2 - I_{\text{з.р.}}). \quad (2.18)$$

В уравнении (2.18) ток I_2 будет соответствовать среднему значению тока при горящем разряде за период.

Еще одним важным фактором, влияющим на эффективность генератора озона, является коэффициент мощности. Он определяется как отношение активной мощности к полной, с учетом нелинейных характеристик, вызванных изломом вольт-амперной характеристики и насыщением по току (описанных ранее).

На основе уравнения активной мощности пластинчатого генератора (2.17) можно составить выражение для расчета коэффициента мощности:

$$\cos\varphi = \frac{U_r \cdot ((U_n - U_r) \cdot C_6 - U_r \cdot C_r)}{U_n \cdot (U_n - U_r) \cdot C_6}. \quad (2.19)$$

Упростив уравнение (2.19), получим:

$$\cos\varphi = \frac{U_r}{U_n} \cdot \left[1 - \frac{U_r \cdot C_r}{(U_n - U_r) \cdot C_6} \right]. \quad (2.20)$$

Если один из множителей уравнения (2.20) будет равен нулю, то и коэффициент мощности обратится в ноль, учитывая, что напряжение на генераторе озона будет равно нулю только в выключенном состоянии в ноль может обратиться только множитель, характеризующийся током. Для определения данного состояния приравняем правую часть уравнения к нулю и произведем математические преобразования:

$$1 - \frac{U_r \cdot C_r}{(U_n - U_r) \cdot C_6} = 0. \quad (2.21)$$

Преобразуем данное выражение относительно напряжения питания:

$$U_n = U_r \cdot \frac{C_r + C_6}{C_r}. \quad (2.22)$$

Полученное соотношение соответствует напряжению зажигания разряда, что согласуется с теорией: в этот момент через разрядный промежуток протекает ток смещения, и, как следствие, активная мощность равна нулю.

Уровень напряжения, при котором коэффициент мощности достигнет максимального значения, может быть найден из уравнения:

$$U_{max} = U_{з.р.} + U_{з.р.} \cdot \sqrt{\frac{C_r}{C_r + C_6}}. \quad (2.23)$$

Анализ зависимостей показывает: коэффициент мощности достигает максимума, когда емкостные составляющие разрядного блока выравниваются. Добиться этого можно лишь путем изменения конструктивных параметров устройства, поскольку они определяют распределение емкостей в системе:

$$C_6 = \frac{\varepsilon_6 \cdot S_6}{b_6}; \quad (2.24)$$

$$C_Г = \frac{\varepsilon_В \cdot S_э}{b_Г}, \quad (2.25)$$

где S_6 – площадь диэлектрического барьера;

ε_6 – диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлен диэлектрический барьер;

b_6 – ширина диэлектрического барьера;

$S_э$ – площадь электрода;

$\varepsilon_В$ – диэлектрическая проницаемость воздуха;

$b_Г$ – ширина воздушного зазора.

Таким образом, для достижения максимального коэффициента мощности необходимо увеличивать ширину воздушного зазора и уменьшать ширину диэлектрического барьера до их оптимального соотношения. Однако на производительность генератора озона оказывают влияние не только эти факторы, поэтому при выборе конструктивных параметров газоразрядного блока необходимо руководствоваться не только достижением максимального $\cos\varphi$, но и факторами, оказывающими влияние на максимальную производительность генератора по озону.

Питание генератора озона, установленного в систему комплексной очистки навозных стоков, осуществляется с помощью повышающего трансформатора, составим схему замещения разрядного устройства (после зажигания разряда) подключенного к источнику питания. Процессы, протекающие в устройстве до зажигания разряда, не представляют интереса так как данный режим не подразумевается техническим регламентом использования установки. Для создания высокого напряжения, которое будет подаваться на разрядный блок,

используем повышающий трансформатор, в этом случае схема замещения (после зажигания разряда) примет вид:

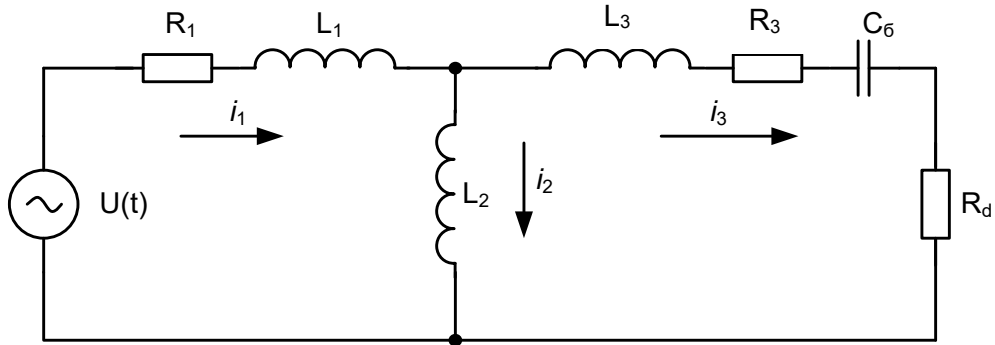


Рисунок 2.3 – Схема замещения генератора озона при горящем разряде

Где L_1 , L_2 , L_3 – индуктивности первичной обмотки, контура намагничивания и вторичной обмотки трансформатора соответственно; R_1 , R_3 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; C_6 – емкость диэлектрических барьеров; R_r – активное сопротивление газоразрядного промежутка в момент горения разряда

Для представленной схемы составим систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа, которая позволит математически описать электрические взаимосвязи между элементами схемы:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \cdot R_1 + i_3 \cdot R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_6} \int i_3 dt + i_3 \cdot R_r = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi); & (2.26) \\ -L_2 \frac{di_2}{dt} + i_3 \cdot R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_6} \int i_3 dt + i_3 \cdot R_r = 0; & (2.27) \\ i_1 - i_2 - i_3 = 0. & (2.28) \end{cases}$$

Произведем математические преобразования и получим уравнение, характеризующее процессы, протекающие в разрядном промежутке при горящем барьерном разряде:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{L_1 L_2 C_6 + L_1 L_3 C_6}{R_1} \right) \cdot \frac{d^3 i_3}{dt^3} + \\ & + \left(\frac{R_1 L_2 C_6 + R_1 L_3 C_6 + R_3 L_1 C_6 + R_3 L_2 C_6 + R_r L_1 C_6 + R_r L_2 C_6}{R_1} \right) \cdot \frac{d^2 i_3}{dt^2} + \\ & + \left(\frac{R_1 R_3 C_6 + R_1 R_r C_6 + L_1 + L_2}{R_1} \right) \cdot \frac{d i_3}{dt} + i_3 = - \frac{U_m \omega^2 L_2 C_6}{R_1} \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Полученные уравнения позволяют рассчитать изменение тока, протекающего через разрядный блок генератора озона при изменении напряжения питания (U_n), частоты питающего сигнала (f, ω), емкости диэлектрических барьеров (C_6), емкости (C_T) и активного сопротивления (R_T) газоразрядного промежутка. Зная величину тока и приложенного напряжения, определим значения активной, реактивной и полной мощности генератора озона. Сопоставив полученные данные сможем оценить степень влияния электрических и конструкционных параметров на показатели мощности генератора озона, а, следовательно, и его производительность. Исследование полученных математических зависимостей проведем с помощью программного комплекса MathCAD, полученные в ходе исследования данные представим в виде графических зависимостей (рисунок 2.4–2.6).

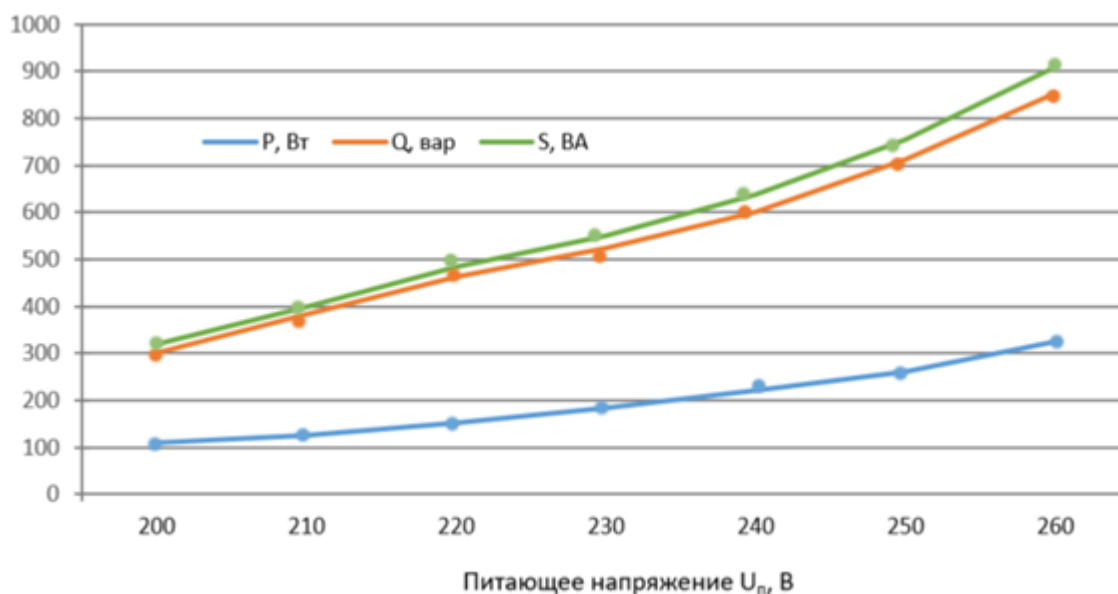


Рисунок 2.4 – Влияние питающего напряжения на активную, реактивную и полную мощности генератора озона при горящем разряде

Анализируя данные, полученные в ходе математических вычислений, представленных на рисунке 2.4, можно сделать вывод о том, что питающее напряжение оказывает незначительное влияние на коэффициент мощности генератора озона, так как увеличение питающего напряжения на 60 В приводит к изменению активной мощности примерно на 200 Вт в то время как прирост

реактивной мощности составляет практически 550 вар, данное увеличение показателей приводит к росту коэффициента мощности с 0,34 до 0,38. Помимо этого увеличение питающего напряжения приводит к росту напряжения приложенного к разрядному блоку, что в свою очередь будет способствовать появлению поверхностных разрядов и как следствие пробую диэлектрических барьеров.

Необходимо отметить, что рост энергозатрат не будет оправдан, так как увеличение питающего напряжения не приведет к значительному росту производительности, который имеет прямо пропорциональную зависимость от коэффициента мощности.

Характеристика влияния емкости газоразрядного промежутка на показатели мощности представим в виде графика (рисунок 2.5).

Анализ данных показывает, что коэффициент мощности ($\cos\varphi$) возрастает с 0,344 до 0,505 при увеличении емкости газоразрядного промежутка с 1 до 1,4 нФ. Дальнейшее повышение емкости до 2,2–2,4 нФ приводит к снижению $\cos\varphi$ до 0,430. Рост коэффициента мощности в диапазоне 1,2–1,5 нФ обусловлен более интенсивным увеличением активной мощности (на 245 %) по сравнению с ростом реактивной (152 %).

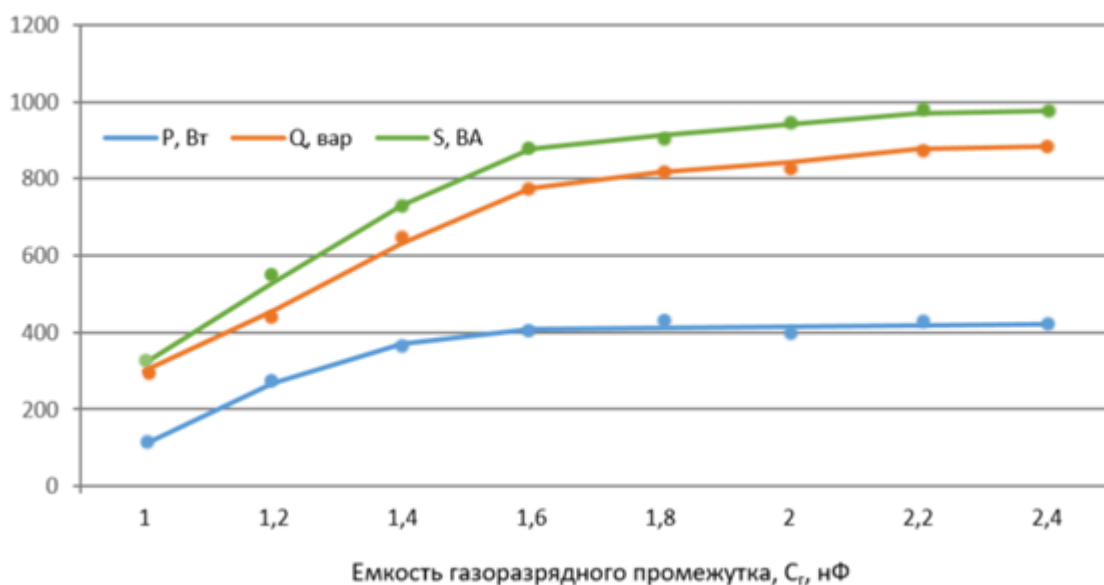


Рисунок 2.5 – Влияние емкости газоразрядного промежутка на активную, реактивную и полную мощности генератора озона при горящем разряде

Также необходимо отметить, что увеличении емкости газоразрядного промежутка выше 1,5 нФ не целесообразно, так как рост показателя активной мощности стабилизируется ($P=410\dots420$ Вт), а прирост показателя реактивной мощности происходит более интенсивными темпами ($Q=775\dots884$ вар), данные изменения связаны прежде всего с увеличением ширины воздушного зазора, что соответствует теоретическим изысканиям, представленным выше. Таким образом, наилучшего сочетания электрических показателей генератора озона удастся достигнуть при ширине воздушного зазора от 2 до 2,5 мм, что соответствует емкости газоразрядного промежутка от 1,2 до 1,5 нФ.

Следующим шагом рассмотрим влияние ширины диэлектрических барьеров на электрические мощности генератора озона, полученные данные представим в виде графической зависимости (рисунок 2.6).

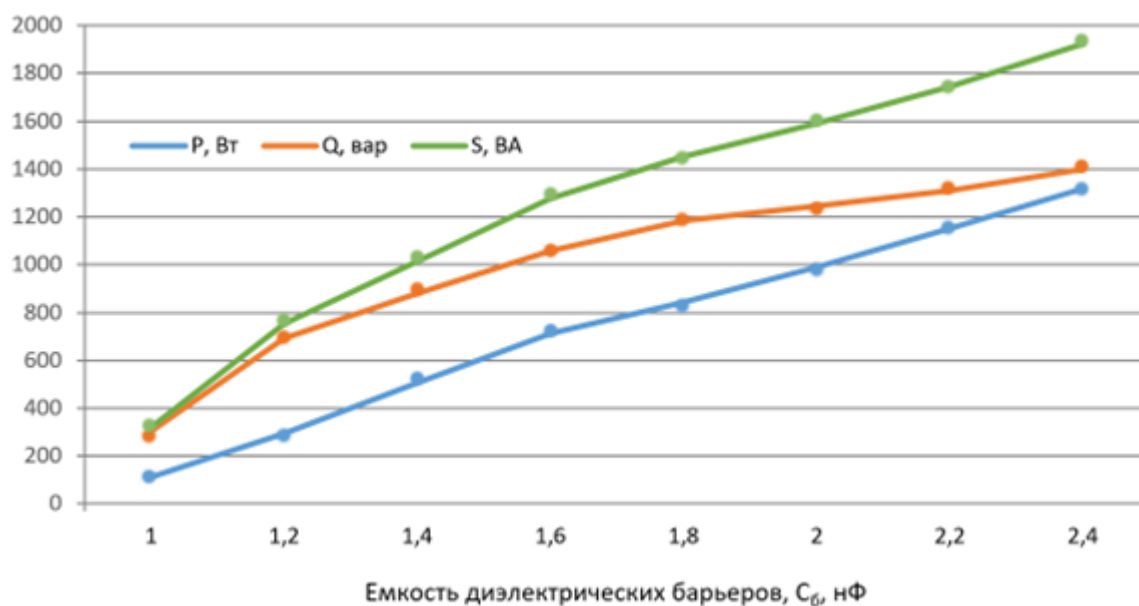


Рисунок 2.6 – Влияние емкости диэлектрических барьеров на активную, реактивную и полную мощности генератора озона при горящем разряде

Проведенное исследование показывает, что наибольшее влияние на коэффициент мощности генератора озона оказывает показатель барьерной емкости. Так постепенное увеличение барьерной емкости от 1 до 2,4 нФ приводит к увеличению практически в 2 раза коэффициента мощности (от 0,34 до 0,68), но необходимо помнить о том, что рост барьерной емкости связан с шириной

диэлектрического барьера, а ее увеличение приводит к снижению диэлектрической проницаемости барьера и увеличению массы устройства.

Помимо этого, необходимо отметить, что прирост активной и реактивной мощности при росте емкости диэлектрических барьеров от 1,0 до 1,8 нФ происходит с идентичной интенсивностью, а после этой точки наблюдается замедление роста реактивной мощности по сравнению с ростом активной мощности, следовательно, рост полной мощности при последующем увеличении барьерной емкости выше 1,8 нФ будет в большей степени обусловлен ростом активной мощности.

Подводя итог проведенным теоретическим изысканиям, можно сказать, что наибольшее влияние на параметры мощности генератора озона оказывает параметр емкости диэлектрических барьеров, а в меньшей степени на показатели мощностей оказывают влияние параметры питающего напряжения и емкости газоразрядного промежутка. Для подтверждения теоретически полученных зависимостей необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования.

2.2 Элементы теории массопередачи при смешивании озона в камере обработки навозных стоков

В целях повышения способности озона растворяться в жидкой среде, нами было предложено смесеобразование проводить не барботированием, а тонкодисперсно распылять сточные воды в закрытой камере, в которую озон подается высоконапорным вентилятором (рисунок 2.7). Навозные стоки проходят 2 этапа очистки. После флотации и центрифугирования, они подаются насосом на механические форсунки. Данный метод позволяет создать туман в камере обработки, так как тонкий распыл форсунками позволяет получить капли диаметром от 1 до 10 мкм. В камере полученный туман обрабатывается озоновоздушной смесью высокой концентрации [49, 50, 51].

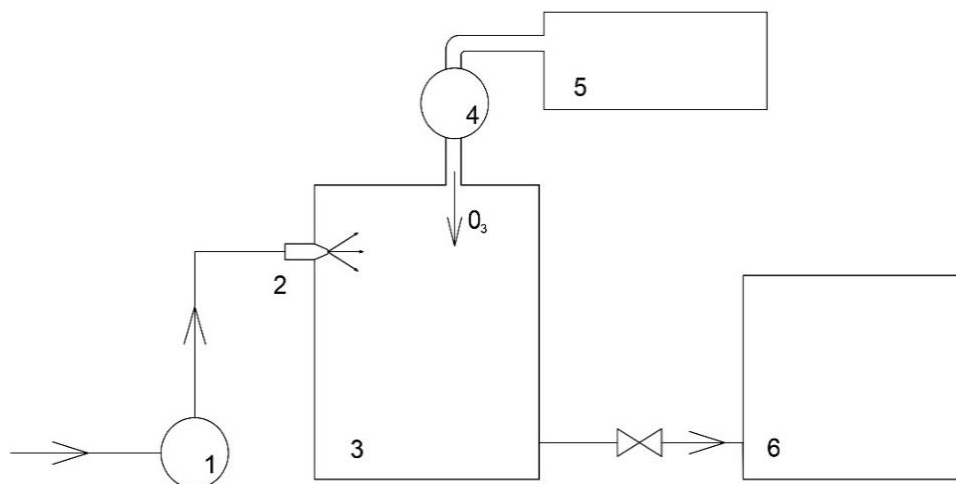


Рисунок 2.7 – Технологическая схема озонирования навозных стоков:

1 – нагнетающий насос; 2 – форсунка; 3 – камера обработки; 4 – вентилятор, нагнетающий озон;
5 – озонатор; 6 – камера для обработанных стоков

В камере обработки навозных стоков с использованием электроозонирования наблюдается активное движение мельчайших капель жидкости в газовой среде, насыщенной высокой концентрацией озона [47, 48].

Проникновение озона в жидкость осуществляется через процесс, называемый абсорбцией (поглощением). Этот процесс зависит от нескольких факторов. К основным этапам и механизмам относится: диффузия озона через границу раздела фаз, растворение озона в жидкости, химические реакции в жидкости [32, 33]. Таким образом, проникновение озона в жидкость – это сложный процесс, зависящий от физических, химических и технологических факторов. Оптимизация этих параметров позволяет повысить эффективность использования озона, например, для обеззараживания воды или других жидкостей [79–80]. Процесс проникновения озона в жидкость можно описать с помощью модели стационарной жидкой пленки. Согласно этой модели, на границе раздела газ-жидкость образуется тонкий слой жидкости, в котором осуществляется массопередача озона из газовой фазы в объем жидкости. Абсорбцию озона можно представить как его диффузию через эту пленку под действием разности концентраций между поверхностью и основным объемом жидкости:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot a \cdot (C^* - C) - Q_{O_3}, \quad (2.30)$$

где K_L – константа, зависящая от коэффициента диффузии и толщины стационарной жидкой пленки, м/с;

a – поверхность раздела фаз на единицу объема жидкости, м⁻¹;

C^* – концентрация озона в жидкой фазе, равновесная с газовой фазой, г/л;

C – реальная концентрация растворенного озона в жидкости, г/л;

Q_{O_3} – скорость потребления озона при химических реакциях в сточных водах, г/л·с.

В реальных условиях, при исследовании процессов массопередачи, параметры K_L и a сложно определить отдельно, поэтому обычно используется их произведение, известное как объемный коэффициент массопередачи. Разность в уравнении $(C^* - C)$ представляет собой движущую силу процесса массопередачи в системе газ-жидкость.

Процесс растворения газа в жидкости и устанавливает зависимость между концентрацией газа в жидкости и его парциальным давлением над жидкостью [25]. Это один из фундаментальных законов физической химии, который применяется для описания равновесия между газовой и жидкой фазами. Уравнение Генри:

$$C = H \cdot p_{O_3}, \quad (2.31)$$

где C – концентрация растворенного озона в жидких стоках (обычно выражается в молях на литр или других единицах концентрации);

H – константа Генри, зависит от свойств обрабатываемой жидкости, г/(л·Па);

p_{O_3} – парциальное давление озона над сточными водами, Па.

Величина концентрации растворенного озона в обрабатываемых стоках зависит от скорости реакций окисления и его транспортировки. Так как в процессе обработки сточных вод в жидкости, при постоянном уровне подаваемого озона устанавливается постоянная скорость вступления озона в реакцию, то процесс приобретает некоторую квазистационарность. Тогда:

$$Q_{O_3} = K_L \cdot a \cdot (C^* - C). \quad (2.32)$$

Как видно из выражения, движущая сила процесса массопередачи максимальна при $C = 0$, то есть при полном отсутствии растворенного озона в сточных водах. При этом скорость абсорбции озона:

$$Q_{O_3} = K_L \cdot a \cdot C^* = K_L \cdot a \cdot H \cdot p_{O_3^*}, \quad (2.33)$$

где $p_{O_3^*}$ – парциальное давление озона в газовой среде, Па.

Абсорбция озона в жидкой среде зависит от площади поверхности раздела фаз на единицу объема жидкости. Обозначим a_1 – площадь поверхности раздела при барботировании, a_2 – площадь поверхности при распылении, тогда изменение градиента концентрации озона при переходе от одного метода подачи к другому будет пропорционально отношению a_2 к a_1 :

$$G = \frac{a_2}{a_1}. \quad (2.34)$$

Тогда, при прочих равных параметрах:

$$\frac{dc}{dt} = G \cdot K_L \cdot a_1 \cdot (C^* - C) - Q_{O_3} = K_L \cdot a_2 \cdot (C^* - C) - Q_{O_3}. \quad (2.35)$$

Для определения коэффициента G , произведем расчет площадей. В числителе у нас площадь раздела фаз на единицу объема при использовании метода распыления, а в знаменателе способ барботирования.

При барботажной подаче озоновоздушной смеси в жидкость диаметр пузырьков газа составляет от 1,0 до 3,0 мм; примем средний диаметр $d_1=2,0$ мм ($R_1=1,0$ мм). При распылении жидкости в камере обработки с помощью тонкодисперсных форсунок размер капель находится в пределах от 1,0 до 10,0 мкм; примем средний диаметр $d_2=5,5$ мкм ($R_2=2,75$ мкм) [44, 50]. Средняя плотность сточных вод животноводческих ферм составляет 1,014–1,016 г/см³, что незначительно превышает плотность чистой воды [68].

Определим объем пузырька для первого варианта:

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi R_1^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 10^{-9}, \text{ м}^3. \quad (2.36)$$

Площадь поверхности одного пузырька определяется по формуле:

$$S_1 = \pi d_1^2 = 4\pi \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2. \quad (2.37)$$

В этом случае количество пузырьков в 1 м³:

$$n_1 = \frac{1}{V_1} = \frac{3}{4\pi} \cdot 10^9. \quad (2.38)$$

Следовательно, общая площадь поверхности пузырьков:

$$S_{\text{общ.1}} = S_1 \cdot n_1 = 4\pi \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3}{4\pi} \cdot 10^9 = 3 \cdot 10^3, \text{ м}^2. \quad (2.39)$$

Следующим шагом произведем расчет параметров для предлагаемого нами метода распыления навозных стоков в озоновоздушную среду, для этого представим значения средних диаметра и радиуса капли следующим образом:

$$d_2 = 5,5 \cdot 10^{-6} = \frac{11}{2} \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

$$R_2 = 2,75 \cdot 10^{-6} = \frac{11}{4} \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Аналогичным образом определим объем капли для предлагаемого варианта V_2 :

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{11}{4}\right)^3 10^{-18}, \text{ м}^3.$$

Площадь поверхности одной капли в этом случае будет равна:

$$S_2 = \frac{121}{4} \pi \cdot 10^{-12}, \text{ м}^2.$$

Определим количество капель в 1 м^3 по формуле:

$$n_2 = \frac{1}{V_2} = \frac{1}{\frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{11}{4}\right)^3 10^{-18}} = \frac{3 \cdot 4^3 \cdot 10^{18}}{4\pi \cdot 11^3}. \quad (2.40)$$

В этом случае общая площадь поверхности капель в 1 м^3 составит:

$$S_{\text{общ.2}} = S_2 \cdot n_2 = \frac{121}{4} \pi \cdot 10^{-12} \cdot \frac{3 \cdot 4^3 \cdot 10^{18}}{4\pi \cdot 11^3} \approx 1,09 \cdot 10^6, \text{ м}^2. \quad (2.41)$$

Отношение общей площади поверхности капли к общей площади поверхности пузырька в 1 м^3 примет вид:

$$G = \frac{S_{\text{общ.2}}}{S_{\text{общ.1}}}, \quad (2.42)$$

и составит:

$$G = \frac{1,09 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^3} = 0,36 \cdot 10^3.$$

Для определения влияния увеличения поверхности межфазового взаимодействия на эффективность процесса приведена система уравнений, описывающая данную электротехнологию:

$$\left\{ \begin{array}{l} grad C_{O_3} = f \left(G; \frac{a_2}{a_1}; S_{общ1}/S_{общ2} \right); \\ V_1 = \frac{4}{3} \pi R_1^3; S_1 = \pi d_1^2; n_1 = \frac{1}{V_1}; \\ V_2 = \frac{4}{3} \pi R_2^3; S_2 = \pi d_2^2; n_2 = \frac{1}{V_2}; \\ S_{общ1} = S_1 n_1; S_{общ2} = S_2 n_2; G = \frac{S_{общ2}}{S_{общ1}}. \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Таким образом изменение технического приема для внесения озона в жидкость позволит значительно увеличить градиент концентрации озона и массопередачу озона через границу раздела фаз, что даст возможность значительно повысить скорость потребления озона при химических реакциях в сточных водах и вероятно насытить данный процесс. В тоже время, из второго закона Фика, связывающего пространственное и временное изменение концентрации следует, что градиент концентрации озона будет определяться коэффициентом диффузии и изменением концентрации озона в камере обработки [60].

2.3 Абсорбация газовой фазы в распыленной жидкой среде

Изменение физических свойств жидкой фазы отходов жизнедеятельности свиней (структуры, плотности, поверхностного натяжения, вязкости) при воздействии электрического поля зависит от электрической проводимости и содержащихся в ней ионов. Соединения и ионы, находящиеся в жидкости, обладают определенными электрическими свойствами, характеризующимися относительной диэлектрической проницаемостью, определяющей способность ионов и соединений изменять свой дипольный момент под воздействием внешнего электрического поля. Диэлектрическая проницаемость воды и мочи примерно одинаковы (80,4 против 82,8) [93], основа обрабатываемой жидкости вода, молекулы которой обладают высоким дипольным моментом. С появлением внешнего электрического поля, увеличивается диэлектрическая проницаемость жидкости, поверхностная плотность заряда, а, следовательно, и способность взаимодействия заряженных капель жидкости с молекулами O_3 .

В теоретическом и практическом отношении представляет интерес определение роли внешнего электрического поля на процесс взаимодействия озона и распыленной жидкой среды, основной составляющей которой является вода [58].

Общее руководящее указание для определения знака электрического заряда фазы дает правило: при соприкосновении двух фаз положительный заряд приобретает вещество с большей диэлектрической проницаемостью. Так как частицы (капли) воды, имеющие большую диэлектрическую проницаемость, равную 81, соприкасаясь с различными веществами, заряжается в большинстве случаев положительно, а молекулы газообразной фазы – отрицательно.

В камере обработки стоков электроозонированием происходит интенсивное движение мельчайших капель жидкости в газовой среде насыщенной озоном.

Считается, что капли жидкости имеют различные размеры, различную плотность и движутся с различными скоростями в различных направлениях.

В основу математической модели движения капель в озоновоздушной смеси положено описание их состояния с помощью вероятностных распределений размеров капель и их скоростей.

Рассмотрим установившееся движение. В этом случае вероятностное распределение различных свойств капель жидкости на определенном расстоянии от верхнего основания камеры обработки не зависит от времени. Происходящие же во времени процессы абсорбации жидкости и озона с помощью скорости движения смеси функционально связываются с переменной величиной z .

Размеры капель описываются двумя взаимно связанными распределениями $C(l, z)$ и $C(\rho, z)$, так что $C(l, z)dl$, где l -высота камеры обработки, представляет собой количество капель размерами из интервала $(l, l+dl)$ в единице массы смеси на расстоянии z от верхнего основания камеры обработки, а $C(\rho, z)d\rho$ – количество капель плотностей из интервала $(\rho, \rho+dl)$ при тех же условиях. Величины и направления скоростей капель различных размеров описываются распределениями вида:

$C(\rho, \bar{v}, z)$, так что $C(\rho, v, z)dv d\rho$ – количество капель плотностей из интервала $(\rho, \rho+d\rho)$, скорости которых заключены в интервале $(\bar{v}, v+d\bar{v})$.

Вследствие влияния множества факторов на движение капель (взаимодействие с другими каплями, потоком озоновооздушной смеси и др.), проекции их скоростей, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, распределены по нормальному закону. При этом средняя скорость каждой капли (\bar{v}_k) и дисперсия скорости (σ_k^2) могут различаться для разных капель. В движении каждой капли имеется регулярная составляющая, в результате чего она, участвуя в мелкомасштабном хаотическом движении, непрерывно перемещается по вертикали. Эта вертикальная составляющая скорости крупномасштабного движения частицы входит как средняя скорость (\bar{v}_z) в нормальное распределение скоростей. Полагается, что $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$ и средние значения проекций скорости на горизонтальные оси ($\bar{v}_x \bar{v}_y$) равны нулю.

Для удобств дальнейших расчетов выберем цилиндрическую систему координат с осью z , направленной вниз вдоль оси камеры обработки. Поэтому:

$$v_z = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad \bar{v}_z = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}. \quad (2.44)$$

С учетом вышеизложенного распределения в проекциях на координатные оси можно записать систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(v_r, v_z, l, \rho, z) dv_r dv_z dl; \\ d\rho = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-v_r^2 + (v_z - v_r)^2}{2\sigma^2} \right] \times dv_r dv_z \cdot C(l, \rho, z) dl d\rho. \end{array} \right. \quad (2.45)$$

В камере обработки находятся частицы различных плотностей, тогда средняя плотность будет равна:

$$\rho = \int_{\rho_{min}}^{\rho_{max}} C(\rho) d\rho. \quad (2.46)$$

При наличии газовой среды плотности ρ в камере обработки каплями жидкости занят не весь объем, а только часть его, равная:

$$m = \int_{\rho_{min}}^{\rho_{max}} C(\rho) d(\rho) < l. \quad (2.47)$$

и в этом случае плотность будет равна:

$$\rho = [\rho'_1(l - m)] + \int_{\rho_{min}}^{\rho_{max}} C(\rho) d(\rho). \quad (2.48)$$

Рассмотрим процесс абсорбции озона каплями, оседающими в камере обработки. Модель основана на подсчете количества озона, абсорбируемого жидкостью в единице массы смеси за время Δt .

Исследуем поведение при абсорбции озона капель двух групп: капли первой группы характеризуются плотностью ρ_1 , размером l_1 и скоростью $\bar{v}_1(v_{1r}; v_{1z})$, и капель второй группы - плотностью ρ_2 , размером l_2 и скоростью $\bar{v}_2(v_{2r}; v_{2z})$.

Капля первой группы движется относительно капли второй группы со скоростью $\bar{v}_{1r} = \bar{v}_1 - \bar{v}_2$ и в этом относительном движении за время Δt проходит путь $v_{1,2} \cdot \Delta t$, взаимодействуя с озоном относительно капли второй группы, если центр последней расположен в объеме $S_{1;2}v_{1,2}\Delta t$, где $S_{1;2}$ – площадь сечения взаимодействия капель. Если в единице массы смеси на расстоянии z содержится $C(\bar{v}_1 l_1 \rho_1 z) d\bar{v}_1 dl_1 d\rho_1$ капель первой группы и каждая из них имеет объем взаимодействия с озоном относительно капель второй группы $S_{1;2}v_{1,2}\Delta t$, то весь объем взаимодействия капель при абсорбции озона равен:

$$C(\bar{v}_1 l_1 \rho_1 z) d\bar{v}_1 d\bar{v}_1 d\rho_1 S_{1;2} v_{1,2} \Delta t. \quad (2.49)$$

Плотность распределения в пространстве капель второй группы характеризуется величиной $C(\bar{v}_2 l_2 \rho_2 z) d\bar{v}_2 dl_2 d\rho_2 V(z)$, где $V(z)$ -объем, занимаемый единицей массы капель на расстоянии z . Тогда число взаимодействий капель первой и второй групп с озоном в единице массы смеси за время Δt определяется равенством:

$$C_{1;2} = C(\bar{v}_1 l_1 \rho_1 z) \cdot C(\bar{v}_2 l_2 \rho_2 z) d\bar{v}_1 d\bar{v}_2 dl_1 dl_2 d\rho_1 d\rho_2 \times \\ \times S_{1;2} v_{1,2} \Delta t / V(z). \quad (2.50)$$

Если проинтегрировать правую часть равенства (2.50) по всем значениям проекций скоростей капель обеих групп и учесть равенство (2.46), то получим число взаимодействий с озоном капель обеих групп за время Δt в единице массы смеси, которое примет вид:

$$\begin{aligned}
C'_{1;2} &= C(l_1\rho_1z) \cdot C(l_2\rho_2z) \times \\
&\times \frac{S_{1;2}\Delta t}{\sigma\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\infty\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1;2} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{2r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{2z} \times \\
&\times \exp\left[\frac{-\bar{v}_{1;2}^2 + (v_{1z} - v_{1r})^2}{2\sigma_1^2}\right] \exp\left[-\frac{v_{2z}^2(v_{2z} - v_{1z})^2}{2\sigma^2}\right] \times \\
&\times \sqrt{(v_{1r} - v_{2r})^2 + (v_{1z} - v_{2z})^2} \cdot \frac{dl_1dl_2d\rho_1d\rho_2}{V(z)}.
\end{aligned} \tag{2.51}$$

С помощью формулы (2.51) путем выведения функции вероятности абсорбции озона каплями при столкновении (γ) можно определить количество капель, убывших из интервала плотностей (ρ , $\rho+d\rho$) в следствии слияния их с каплями других размеров.

$$\begin{aligned}
C_r(\rho_1z)d\rho &= C(\rho_1z) \int_0^{1-\rho} C(\rho_1z)j(\rho_1\rho) \times \\
&\times \frac{S(\rho_1\rho)\Delta t d\rho_1}{\sigma\sqrt{2\pi}V(z)\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dv_2 \int_{-\infty}^{\infty} dv_z \times \\
&\times \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \exp\left[-\frac{v_r^2 + (v_z - \bar{v}_r)^2}{2\sigma^2}\right] \times \\
&\times \exp\left[-\frac{v_{1r}^2 + (v_{1z} - \bar{v}_{1r})^2}{2\sigma^2}\right] \times \sqrt{(v_r - v_{1r})^2 + (v_z - v_{1r})^2}.
\end{aligned} \tag{2.52}$$

Аналогично определяется количество капель, абсорбирующих озон, пополнивших интервал (ρ , $\rho+d\rho$) за счет слияния более мелких капель.

При этом следует иметь в виду, что капля плотности ρ может образоваться при взаимодействии с озоном и каплей любой плотности $\rho_1 < \rho$ с каплей плотности $\rho_2 = \rho - \rho_1$:

$$\begin{aligned}
C_1(\rho, z)d\rho &= \\
&= \frac{1}{2} \int_0^\rho C(\rho - \rho_1, z)d\rho \cdot C(\rho, z)\gamma(\rho_1 - \rho_{1z}, \rho_1) \frac{S(\rho_1 - \rho_1, \rho_1)\Delta t d\rho_1}{V(z)v_{(0-1)}\sqrt{2\pi}\sigma\sqrt{2\pi}} \times \\
&\times \int_{-\infty}^{\infty} dv_{(0-1)r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{(0-1)z} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1r} \times \\
&\times \exp\left[-\frac{v_{(0-1)r}^2 + (v_{(0-1)r} - v_{(0-1)z})^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{v_{1,2}^2 + (v_{1z} - v_{1r})^2}{2\sigma}\right] \times \\
&\times \sqrt{(v_{(0-1)r} - v_{1r})^2 + (v_{(0-1)z} - v_{1r})^2}.
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Если вместо $\Delta t = \frac{\Delta z}{v(z)}$, где элемент кольцевого пространства длиной Δz , а $v(z)$ – скорость движения капель смеси на расстоянии z от верхнего основания

камеры обработки, подставить в формулы (2.52) и (2.53), объединить их и перейти к пределу при $\Delta z \rightarrow 0$, то получится интегрально-дифференциальное уравнение процессов абсорбции озоновоздушной смеси в нейтральной среде:

$$\frac{dC(\rho, z)}{dz} = C_1(\rho z)d\rho - C_2(\rho z)d\rho. \quad (2.54)$$

Концентрация капель обрабатываемой жидкости, различная в различных точках камеры, вызывает силы, стремящиеся выровнять концентрацию по всему объему. Поэтому капли будут диффундировать от плоскости, где концентрация больше, к другой, где она меньше. Скорость, с которой диффундируют частицы, пропорциональна градиенту концентрации в данном месте и направлена в сторону максимального градиента.

Количество вещества Q , диффундирующего сквозь единицу площади плоскости $z = z'$, будет пропорционально градиенту концентрации капель жидкости в этой плоскости, т. е. $\left. \frac{dC}{dz} \right|_{z = z'}$.

Коэффициент пропорциональности между Q и $\frac{dC}{dz}$ обозначим K . Величина этого коэффициента зависит как от свойств озоновоздушной смеси, в которой происходит осаждение капель обрабатываемой жидкости, так и от свойств самой жидкости и является коэффициентом диффузии, который можно определить по формуле:

$$Q = K \frac{dC}{dz}. \quad (2.55)$$

Величина Q , количество капель, диффундирующих за единицу времени через единицу площади, равна Cv , где v - скорость движения капель под действием градиента сил. Итак, скорость движения капель, вызванная градиентными силами равна:

$$v = \frac{KdC}{Cdx}. \quad (2.56)$$

Скорость направлена в сторону убывания концентрации, поэтому в общем случае для трехмерного пространства:

$$\bar{v} = -\frac{K}{C} \text{grad}C. \quad (2.57)$$

Если умножить скорость на коэффициент сопротивления среды α , то получим выражение, определяющее градиентную силу, вызванную неравномерностью концентрации смеси в камере, т. е.

$$F_r = -\frac{K\alpha}{c} \text{grad } C. \quad (2.58)$$

а для одномерного пространства $\bar{g} \parallel \bar{z}$:

$$F_r = -\frac{K\alpha}{C} \cdot \frac{dC}{dz}. \quad (2.59)$$

Подставив вместо $\frac{dC}{dz}$ его значение из выражения (2.54), получим выражение, описывающее градиентную силу, возникающую при осаждении распыленных капель жидкости в озоновоздушной смеси:

$$F_r = -\frac{K\alpha}{C(\rho z)} [C_1(\rho z)d\rho - C_2(\rho z)d\rho]. \quad (2.60)$$

Таким образом, используя (2.52), (2.53) и (2.60) получим систему:

$$C_1(\rho z)d\rho \left\{ \begin{array}{l} C_r(\rho_1 z)d\rho = C(\rho_1 z) \int_0^{1-\rho} C_r(\rho_1 z) dj(\rho_1 \rho) \times \frac{S(\rho_1 \rho) \Delta t d\rho_1}{\sigma \sqrt{2\pi} V(z) \sigma \sqrt{2\pi}} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} dv_2 \int_{-\infty}^{\infty} dv_z \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \exp \left[-\frac{v_r^2 + (v_z - \bar{v}_r)^2}{2\sigma^2} \right] \times \\ \times \exp \left[-\frac{v_r^2 + (v_z - \bar{v}_r)^2}{2\sigma^2} \right] \times \sqrt{(v_r - v_{1r})^2 + (v_z - v_{1z})^2}; \\ C'_{1;2} = C(l_1 \rho_1 z) \cdot C(l_2 \rho_2 z) \frac{S_{1;2} \Delta t}{\sigma \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\infty} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1;2} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} dv_{2r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{2;z} \times \exp \left[\frac{-\bar{v}_{1;2}^2 + (v_{1z} - v_{1r})^2}{2\sigma_1^2} \right]^{-\infty} \times \\ \times \exp \left[-\frac{v_{2z}^2 (v_{2z} - v_{1z})^2}{2\sigma^2} \right] \times \\ \times \sqrt{(v_{1r} - v_{2r})^2 + (v_{1z} - v_{2z})^2} \cdot \frac{dl_1 dl_2 d\rho_1 d\rho_2}{V(z)}; \\ F_r = -\frac{K\alpha}{C(\rho z)} [C_1(\rho z)d\rho - C_2(\rho z)d\rho]. \end{array} \right. \quad (2.61)$$

Представленная система описывает градиентную силу, возникающую при осаждении распыленной жидкости в озоновоздушной смеси [36]. Следовательно,

система уравнений описывает совокупность влияющих факторов на число взаимодействий с озоном распыленной жидкости за время Δt в единице массы.

2.4 Абсорбация газовой фазы в распыленной жидкой среде при наличии электрического поля

Чтобы рассчитать напряженность электрического поля, необходимую для левитации тумана (мелкодисперсных капель жидкости) внутри камеры обработки, нужно учитывать баланс сил, действующих на капли. Основные силы, которые нужно учесть, – это электростатическая сила, действующая на заряженные капли, и сила тяжести. Также важно учитывать силу сопротивления воздуха, так как находятся в непрерывном движении.

Для составления уравнения баланса сил, действующих на капли необходимо учитывать следующие параметры и их влияние на водный туман:

- капли тумана имеют заряд q ;
- масса капли m определяется ее радиусом r и плотностью жидкости ρ :

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho; \quad (2.62)$$

- напряженность электрического поля E направлена вертикально вверх, чтобы противодействовать силе тяжести;
- сила сопротивления воздуха (вязкое трение) так как капли движутся.

Составим уравнение баланса сил, которое будет удовлетворять следующему требованию - для левитации капли необходимо, чтобы электростатическая сила F_e компенсировала силу тяжести F_g .

Электростатическая сила определяется следующим образом:

$$F_e = q \cdot E. \quad (2.63)$$

Для определения силы тяжести используем выражение:

$$F_g = m \cdot g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \cdot g. \quad (2.64)$$

где g – ускорение свободного падения ($\approx 9,81$ м/с²);

ρ – плотность жидкости (для воды $\rho \approx 1000$ кг/м³).

Таким образом, условие взвешенного состояния капле примет вид:

$$q \cdot E = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \cdot g. \quad (2.65)$$

Напряженность электрического поля E , необходимая для левитации, выражается как:

$$E = \frac{4\pi r^3 \rho g}{3q}. \quad (2.66)$$

Для использования данной формулы, необходимо знать радиус капли r (зависит от размера сопла форсунки) и ее заряд q . Заряд капли зависит от способа его образования. В случае, если капля образуется в результате электростатического распыления, их заряд можно оценить с помощью закона Рэлея:

$$q = 4\pi \varepsilon_0 r^2 E_0, \quad (2.67)$$

где ε_0 – электрическая постоянная ($\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

E_0 – напряженность электрического поля, приложенного к распылителю.

Если заряд капли неизвестен, его можно оценить экспериментально или использовать типичные значения для электростатически заряженных капель. Форма капли близка к сфере, поэтому рассчитаем поверхностный заряд сферы. Поверхностный заряд σ – это заряд, равномерно распределенный по площади поверхности тела. Его единица измерения в СИ – Кулон на квадратный метр (Кл/м²). Если заряд q распределен по поверхности площадью A , то поверхностный заряд определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{q}{A}, \quad (2.68)$$

где q – общий заряд;

A – площадь поверхности.

Для капли радиусом $R=2,75$ мкм покрытой зарядом $q=10^{-15}$ Кл, поверхностный заряд определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{q}{4\pi R^2}, \quad (2.69)$$

и составит:

$$\sigma = 0,01 \cdot 10^{-15} \text{ Кл/м}^2.$$

Согласно закону Кулона, сила взаимодействия между двумя точечными зарядами q_1 и q_2 , находящимися на расстоянии r друг от друга, определяется соотношением:

$$F_k = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (2.70)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (например, для воздуха $\varepsilon_r \approx 1$, для воды $\varepsilon_r \approx 80$).

Капли не являются точечными зарядами, поэтому расстояние между ними следует измерять от центра одной капли до центра другой. При этом минимальное расстояние между каплями ограничивается суммой их радиусов, следовательно для капель радиусом 2,75 мкм, расстояние между центрами составит $r > 5,5$ мкм. Таким образом для двух капель:

$$q_1 = q_2 = \sigma \cdot 4\pi R^2 = 10^{-15} \text{ Кл.} \quad (2.71)$$

Подставив имеющиеся данные в формулу 2.70, получим:

$$F_k = \frac{1}{4\pi(8,854 \cdot 10^{-12})} \cdot \frac{(10^{-15})^2}{(5,5 \cdot 10^{-6})^2}; \quad (2.72)$$

$$F_k = 1,634 \cdot 10^{-9} \text{ Н.}$$

Зная, что сила взаимодействия между каплями зависит от их заряда, определим ее величину при разных уровнях заряда капли. Полученные в результате расчета данные представим в виде графической зависимости (рисунок 2.8).

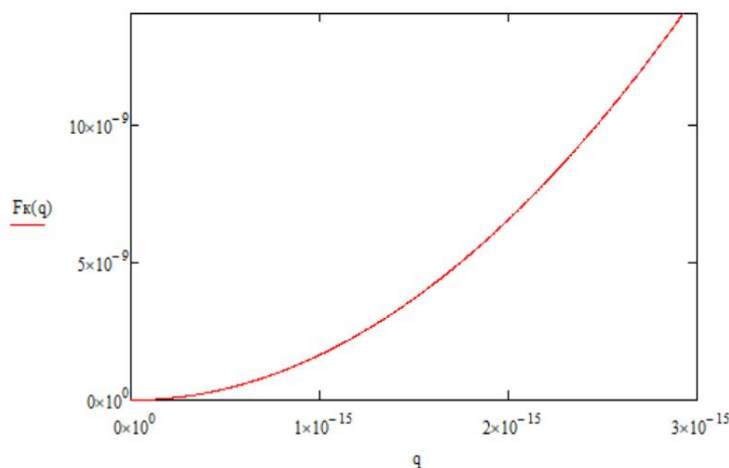


Рисунок 2.8 – Влияние уровня заряда капли на величину силы взаимодействия между ними

Электрические силы между каплями превышают силу тяжести, что позволит каплям отталкиваться друг от друга и равномерно заполнять объем камеры.

Зная радиус капли и необходимый уровень ее заряда, для поддержания взвешенного состояния водяного тумана внутри камеры обработки, по формуле 2.66 определим необходимую напряженность электрического поля:

$$E \approx \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-15} \cdot 1000 \cdot 9,81}{3 \cdot 10^{-15}} \approx 855 \text{ В/м} .$$

Таким образом, для поддержания взвешенного состояния капель с радиусом 2,75 мкм им необходимо передать заряд 10^{-15} Кл. Требуемый заряд возможно получить при создании напряженности электрического поля около 855 В/м.

Так как капли перемещаются внутри обрабатываемой емкости, в расчетах необходимо учитывать силу сопротивления воздуха F_d , которая определяется по формуле Стокса:

$$F_d = 6\pi\eta r v , \quad (2.73)$$

где η – динамическая вязкость воздуха ($\approx 1,8 \cdot 10^{-5}$);

v – скорость капли.

В установившемся режиме (когда капля находится во взвешенном состоянии скорость ее перемещения становится постоянной), следовательно, уравнение взвешенного состояния капли примет вид:

$$q \cdot E = m \cdot g + 6\pi\eta r v , \quad (2.74)$$

Это уравнение позволяет учесть влияние скорости капли на требуемую напряженность поля.

Помимо проведенных расчетов необходимо учесть, что взвешенные капли жидкости вызывают случайные блуждания в газовой среде. В случайном блуждании частица подвергается последовательным перемещениям $r_1, r_2, r_3 \dots r_i$, причем абсолютная величина и направление каждого перемещения независимы от всех предыдущих. Но вероятность того, что перемещение r_i лежит между r_i и $r_i + dr_i$, подчинена функции распределения $W_i(r_i)$. А какова же вероятность $W(R)dR$, что после N перемещений координаты капли будут лежать в интервале $R + dR$? Очевидно, что в этой задаче положение частицы R является результирующей N

векторов $r_i (i = 1, 2, 3 \dots N)$ величина и направление каждого из которых подчинены вероятностному распределению.

Одной из главных задач при обстоятельном рассмотрении данного вопроса является конкретизация характера функции распределения $W(\Phi)$ некоторой величины Φ (в общем случае Φ – вектор пространства), которая является результирующей большого числа других величин. Значение этих последних, в свою очередь, подчинены вполне определенным распределениям.

Второй задачей вопроса является выяснение вероятностного последствия. Описать смысл этого вопроса можно следующим образом. Некоторая величина Φ характеризуется стационарным распределением $W(\Phi)$. Впервые мы проводим измерение Φ в некоторый момент времени $t = 0$, а затем снова повторяем наше измерение в более поздний момент времени t . Спрашивается, что можно сказать о возможных значениях Φ , которые следует ожидать при измерении в момент времени t , если известно, что Φ имела определенное значение при $t = 0$.

Предположим, что вокруг каждой капли жидкости образуется «сфера» влияния определенного радиуса R , молекулы озона, попадая в эту сферу абсорбируются жидкостью. Одновременно с этим, приближаясь, на расстояние R , капли сливаются, образуя единое целое. В результате таких процессов и происходит абсорбция озоновоздушной смеси жидкостью.

Изменение W вызывается движением капель жидкости под действием сил. На единицу объема частиц действует сила, численно равная $\bar{g}(\rho_T - \rho_{ж})$, где \bar{g} – ускорение свободного падения, ρ_T и $\rho_{ж}$ – соответственно плотность газовой и жидкой среды. В нашем случае также необходимо учитывать силу сопротивления $\alpha\bar{v}$, пропорциональную скорости, α – коэффициент сопротивления.

Если среда помещена в электрическое поле, то на единицу объема будет действовать сила:

$$\bar{F}_{эл} = [q\bar{E}], \quad (2.75)$$

где E – напряженность электрического поля.

Приравнивание равнодействующей всех этих сил нулю с учетом (2.59) дает выражение для скоростей капель жидкости:

$$\bar{v} = -\frac{K}{C} gradC + \frac{\bar{g}}{\alpha} (\rho_{\tau} - \rho_{ж}) + \frac{[q\bar{E}]}{\alpha}. \quad (2.76)$$

Применяя закон сохранения вещества, получим:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -div(\bar{v}C), \quad (2.77)$$

и используя выражение (2.47), получим для одномерного пространства $\bar{g} \parallel \bar{z}$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \{C[\bar{g}(\rho_{\tau} - \rho_{ж}) + qE]\} = K \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + M \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (2.78)$$

где $M = -\frac{1}{\alpha} [\bar{g}(\rho_{\tau} - \rho_{ж}) + qE]$.

Таким образом, поскольку в плоскости xu распределение частиц остается прежним, ограничимся изучением распределения по вертикали.

Предположим, что первоначально частицы взвеси находились на высоте z от дна камеры обработки. Тогда вероятность обнаружения капель на высоте z для последующих моментов времени будет определяться решением уравнения (2.78) совместно с граничными условиями:

$$C \rightarrow \delta(z - z_0) \quad t \rightarrow 0, \quad \delta - \text{функция Дирака};$$

$$K \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) + MC = 0, \quad (2.79)$$

при $z = 0$ для всех $t > 0$.

Второе из этих граничных условий означает требование, чтобы ни одна капля не пересекала плоскости $z = 0$, т. е. дна камеры обработки.

Чтобы получить решение уравнения (2.78), удовлетворяющее граничным условиям (2.79), прежде всего произведем следующую замену переменных:

$$C = u(zt) \exp \left[-\frac{M}{2K} (z - z_0) - \frac{M^2}{4K} \cdot t \right]. \quad (2.80)$$

Тогда уравнение (2.78) приводится к форме:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (2.81)$$

Граничные условия принимают вид:

$$\begin{cases} u \rightarrow \sigma(z - z_0) \text{ при } t \rightarrow 0 \\ K \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} M u = 0 \text{ при } z = 0 \text{ для всех } t > 0. \end{cases} \quad (2.82)$$

Решая уравнения (2.81) при граничных условиях вида (2.82), имеем:

$$\begin{aligned} u = & \frac{1}{2(\pi K t)} \cdot \frac{1}{1} \left\{ \exp \left[-\frac{(z - z_0)^2}{4Kt} \right] + \exp \left[-\frac{(z + z_0)^2}{4Kt} \right] \right\} + \\ & + \frac{M}{2K(\pi K t)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{(\alpha + z)^2}{4Kt} + \frac{M(\alpha - \alpha_0)}{2K} \right] d\alpha. \end{aligned} \quad (2.83)$$

После некоторых преобразований выражению (2.83) можно придать следующую форму:

$$\begin{aligned} u = & \frac{1}{2K(\pi K t)^{\frac{1}{2}}} \left\{ \exp \left[-\frac{(z - z_0)^2}{4Kt} \right] + \exp \left[-\frac{(z + z_0)^2}{4Kt} \right] \right\} + \frac{M}{K\sqrt{\pi}} \times \\ & \times \exp \left[\frac{M^2 t}{4K} - \frac{M(z + z_0)}{2K} \right] \int_0^{\infty} \exp(-x)^2 dx \frac{z + z_0 - Mt}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}}. \end{aligned} \quad (2.84)$$

Возвращаясь к переменным C , получим:

$$\begin{aligned} C(t, z, z_0) = & \frac{1}{2(\pi K t)^{\frac{1}{2}}} \left\{ \exp \left[-\frac{(z - z_0)^2}{4Kt} \right] + \exp \left[-\frac{(z + z_0)^2}{4Kt} \right] \right\} \times \\ & \times \exp \left[-\frac{M(z - z_0)}{2K} - \frac{M^2}{4K} t \right] + \frac{M}{K\sqrt{\pi}} e^{-\frac{Mz}{K}} \int_{\frac{z+z_0-Mt}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}}}^{\infty} \exp(-x^2) dx, \end{aligned} \quad (2.85)$$

что и является искомым решением вероятности обнаружения капель на высоте z для последующих моментов времени.

Из выражения (2.85) при $t \rightarrow \infty$ получим распределение:

$$C(z, \infty, z_0) = \frac{M}{K} e^{-\frac{Mz}{K}}. \quad (2.86)$$

Уравнение (2.86) характеризует установившийся режим.

Теперь предположим, что одна из капель неподвижна, и найдем, как часто, т. е. через какие промежутки времени, ею будут поглощаться молекулы озона, соприкасаться другие, совершающие движение капли, при условии, что каждое

соприкосновение ведет к наращиванию абсорбции озона. Так как частицы жидкости соприкасаются, когда расстояние между их центрами делается равным сумме их радиусов, то можно заменить неподвижную каплю «поглощающей сферой» с радиусом $2r$, а другие частицы – их центрами. Обозначим через $W(at)$ вероятность того, что центр частицы, находящийся в момент $t = 0$ на расстоянии a от центра поглощающей сферы, соприкоснется с ней за время t .

В выражении (2.78) M – проекция скорости вынужденного движения на ось z . Функция $W(z,t)$ должна удовлетворять начальным условиям:

$$w(z, 0) = 0 \text{ при } z \neq 0, w(z, 0) = 1 \text{ при } z = 0, \quad (2.87)$$

и граничному условию:

$$w(0t) = 1 \text{ при } t \geq 0. \quad (2.88)$$

Если начальная концентрация W_0 , а начальное условие $W(a, 0) = W_0$ при $a > 2r$ граничное условие $W(2r, t) = 0$ при $t > 0$, то в полярных координатах уравнение (2.78) можно представить в виде:

$$\frac{\partial(wa)}{\partial t} = K \frac{\partial^2(wa)}{\partial a^2} + M \frac{\partial(wa)}{\partial a}. \quad (2.89)$$

функция $aw(at)$ должна удовлетворять уравнению (2.89) и условиям:

$$\begin{cases} aw(a, 0) = aw_0 & \text{при } a > 2r; \\ w(2rt) = 0 & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (2.90)$$

Функция W должна также удовлетворять условиям:

$$w(2r, t) = 1 \text{ и } w(a, 0) = 0 \text{ при } a > 2r. \quad (2.91)$$

В случае отсутствия внешних сил движений среды $M = 0$ решение уравнения (2.89) будет иметь вид:

$$w(at) = \frac{2r}{a} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a - 2r}{2\sqrt{Kt}} \right) \right], \quad (2.92)$$

где erf – интеграл вероятности (функция Крампа).

Если счетная концентрация распыленной жидкости равна C , то за время t в среднем с неподвижной каплей произойдет количество соприкосновений:

$$d\varphi = Cw(at)4\pi a^2 da. \quad (2.93)$$

Общее количество соприкосновений за время t можно определить по формуле:

$$\varphi = 4\pi C \int_a^\infty w(a, t) a^2 da. \quad (2.94)$$

За время $(t, \varphi + dt)$ число соприкосновений составит:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} dt = 4\pi C dt \int_0^\infty \frac{\partial w(at)}{\partial t} a^2 da = 8\pi r K C \left(1 + \frac{2r}{\sqrt{\pi K t}}\right) dt, \quad (2.95)$$

а за время $(0, t)$:

$$\varphi = 8\pi r K C \left(t + \frac{4r\sqrt{t}}{\sqrt{\pi K}}\right). \quad (2.96)$$

Из (2.96) следует, что при $\frac{2r}{\sqrt{\pi K t}} < 1$ средний промежуток времени между соприкосновениями равен $\frac{1}{8} \pi r K C$. Благодаря члену $\frac{2r}{\sqrt{\pi K t}}$ в начале процесса эти промежутки будут несколько короче. Для того чтобы найти среднюю величину первого промежутка t (от $t=0$ до первого соприкосновения) положив в (2.96) $\varphi = 1$, найдем:

$$t_1 = \frac{1}{8\pi r K C} \left[1 + 6uCr^3 \sqrt{(6uCr^3)^2 + 128Cr^3}\right] \approx \frac{1}{8\pi r K C}. \quad (2.97)$$

По существу, всякое электрическое или магнитное явление, рассматриваемое в целом, всегда оказывается электромагнитным.

Электромагнитное поле, куда помещена распыленная жидкая фаза стоков и озоновоздушная смесь, в самом общем случае, определяется полем четырех векторных величин $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{B}$. Величины индукций связаны с соответствующими напряженностями соотношениями:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (2.98)$$

где ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

В большей части практических задач ε и μ – константы, и, следовательно электрические и магнитные поля определяются не четырьмя векторами, а лишь двумя: \vec{D} или \vec{E} для электрического поля и \vec{B} или \vec{H} для магнитного поля.

Источниками электрических и магнитных полей являются электрические заряды и токи. Будем считать, что распределение зарядов определяется скалярной

величиной объемной плотности зарядов ρ_e , а распределение токов – вектором плотности тока.

В основе методов решения уравнений электродинамики лежат уравнения Максвелла, которые, будучи написанными в дифференциальной форме, имеют вид:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{B} = 0; \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{D} = 0; \\ \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}; \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}. \end{cases} \quad (2.99)$$

Для среды, движущейся со скоростью \vec{U} выражение для \vec{j} примет вид:

$$\vec{j} = \gamma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}), \quad (2.100)$$

где γ – электропроводность проводящей среды.

Из всех приведенных уравнений электродинамики лишь один обобщенный закон Ома связывает электромагнитные параметры со скоростью движения среды \vec{U} . Таким образом, обобщенный закон Ома можно представить в виде функциональной зависимости:

$$j = \varphi(\gamma; \mu; \rho_e; \vec{E}; \vec{H}; \vec{U}; \dots \dots). \quad (2.101)$$

На основании уравнений Максвелла можно привести упрощения. Дело в том, что в рассматриваемых нами случаях токи проводимости несравненно больше токов смещения, поэтому член $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ в уравнении (2.99) можно отбросить. Что же касается непроводящей среды, то токи смещения столь малы, что никакого практического значения не имеют.

Таким образом, уравнения $\operatorname{rot} \vec{H}$ и $\operatorname{rot} \vec{E}$ примут вид:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}. \quad (2.102)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (2.103)$$

Уравнения динамики для несжимаемой жидкости состоят из уравнения движения и уравнения неразрывности. Первое можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \bar{F}_0 - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \bar{U} + \frac{1}{\rho} [\bar{j} \times \bar{B}] + \frac{\mu - \mu_0}{2\mu} \text{grad } B^2. \quad (2.104)$$

где p – давление в жидкой фазе;

ρ – плотность капли;

ν – кинематический коэффициент вязкости;

∇^2 – оператор Лапласа.

Если рассматривать немагнитные среды, то величина магнитной проницаемости μ будет равна μ_0 , а уравнение движения с учетом (2.101) примет вид:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + [\bar{u} \cdot \nabla] \bar{u} = \frac{1}{\rho} \bar{F}_0 - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \bar{u} + \frac{\gamma}{\rho} [\bar{E} \cdot \bar{B} + (\bar{u} \cdot \bar{B}) \cdot \bar{B}]. \quad (2.105)$$

Второе уравнение, уравнение неразрывности, в нашем случае будет иметь вид:

$$\text{div } \bar{U} = 0. \quad (2.106)$$

Согласно законам электродинамики, перемещение магнитного поля в пространстве, с точки зрения неподвижного наблюдателя, всегда сопровождается возникновением электрического тока. Поэтому можно сказать о бегущем электромагнитном поле. Оправдание этому названию можно найти в том обстоятельстве, что энергия, заключенная в электрической составляющей бегущего поля, несравненно меньше (примерно в $\frac{V^2}{c}$ раз, где V – скорость бегущего магнитного поля, c – скорость света) той, которая заключена в магнитной составляющей.

Не следует путать бегущее электромагнитное поле с электромагнитной волной, общие свойства которых исчерпываются тем, что они содержат как электрическую, так и магнитную составляющую. Остальные их характеристики резко различаются, поскольку бегущее электромагнитное поле – квазистационарное и распределение его в пространстве определяется пространственным распределением токов, возбуждающих это поле.

Под действием электрического поля капли жидкости, имея большую поверхность, захватывают ионы озона из воздушной смеси. Вокруг каждой капли формируется слой противоионов, часть которых перемещается вместе с ней,

образуя абсорбционный слой. Заряд капли не полностью компенсируется противоионами, поэтому она остается электрически заряженной. Малые капли благодаря диффузии не оседают, а остаются во взвешенном состоянии, продолжая поглощать озон. В результате в камере создается сложное трехмерное электрическое поле, расчет которого сложнее плоскопараллельного.

Проведем сравнение напряженности и пандермоторной силы трехмерного поля (рисунок 2.9). Представим две уединенные капли жидкости, содержащиеся в камере обработки, в виде шаров радиусов R_1 и R_2 с электрическими потенциалами границы $u_1 = const$ и $u_2 = const$. При расчете поля шаровых частиц применяем бицилиндрическую систему координат (σ, τ, z) .

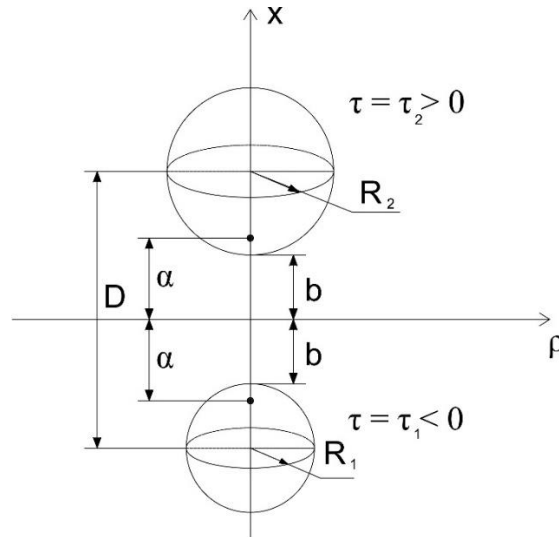


Рисунок 2.9 – Система координат для расчета поля

Связь между координатами x, y, z и бицилиндрическими координатами σ, τ, z для нашего плоско-меридианного поля, где $z = 0$, будет иметь вид:

$$x = \frac{a \cdot sh \tau}{ch \tau - \cos \sigma}; \quad y = \frac{a \cdot \sin \sigma}{ch \tau - \cos \sigma}; \quad z = 0, \quad (2.107)$$

где a – абсцисса полюса (рисунок 2.9).

Ограничимся $r_1 = r_2 = r$. При равных радиусах равны и координаты $|\tau_1| = |\tau_2|$. Тогда связь между геометрическими параметрами системы и координатами границ τ_1 определяется из соотношения:

$$\tau_1 = arch \frac{D}{2R}, \quad (2.108)$$

где D – расстояние между центрами окружностей.

Потенциальная функция поля u при $r_1 = r_2$ и $u_1 = -u_2$ имеет вид:

$$u(\sigma\tau) = \sqrt{2(ch\tau) - \cos\sigma} \cdot \frac{u_1 - u_2}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau}{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)h} \times \exp\left[-\left(h + \frac{1}{2}\right)\tau P_n(\cos\sigma)\right], \quad (2.109)$$

где $\sigma\tau$ – координаты рассматриваемой точки поля;

$P_n(\cos\sigma)$ – сферическая функция Лежандра первого рода степени n .

Известно, что напряженность электрического поля выражается через градиент потенциала $\vec{E} = grad u$.

Дифференцируя (2.109) по координате τ , найдем составляющую E_τ :

$$E_\tau = \frac{u_1 - u_2}{2\sqrt{2}} \left[\frac{sh\tau}{\sqrt{ch\tau - \cos\sigma}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau}{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau_1} \right] \times \exp\left\{-\left(h + \frac{1}{2}\right)\tau P_n(\cos\sigma) + \sqrt{ch\tau - \cos\sigma} \sum_{n=\infty}^{\infty} \frac{ch\left(n + \frac{1}{2}\tau\right)}{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)}\right\} \times \exp\left\{-\left[\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau_1 P_n(\cos\sigma) \left(n + \frac{1}{2}\right)\right]\right\} \quad (2.110)$$

Пондеромоторную силу можно найти из (2.99) и (2.110) и соотношений:

$$E = \sqrt{E_\tau^2 + E_\sigma^2} \quad (2.111)$$

$$F_\tau = \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot \frac{\partial |E_\tau^2 + E_\sigma^2|}{\partial \tau}, \quad (2.112)$$

где R – радиус частицы;

ε_1 и ε_2 – диэлектрическая проницаемость газовой среды и капли жидкости.

При $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ и $F_\tau < 0$ капля жидкости выталкивается из более интенсивных в более слабые участки поля. При $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ – наоборот.

Таким образом, в неоднородном электрическом поле на каплю жидкости действуют одновременно две силы: пондеромоторная, обусловленная неоднородностью электрического поля, и кулоновская, обусловленная наличием на частице электрического заряда.

При помощи формул (2.110) и (2.112) можно исследовать изменения E и F в некоторых направлениях по высоте камеры обработки, точнее по координате τ при фиксированном σ . Определим E и F в различных точках по линии, соединяющей центры шаров, где $\sigma = \pi$. На этом отрезке направление E_τ совпадает с направлением E_x , поэтому E_x можно выразить через E_τ :

$$F_\tau = \frac{\partial u(\sigma\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} = E_\tau \frac{\partial \tau}{\partial x}. \quad (2.113)$$

Продифференцировав уравнение при $\sigma = \tau$, можно найти $\frac{\partial \tau}{\partial x}$:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{2ch^2 \frac{\tau}{2}}{a} = \frac{4ch^2 \frac{\tau}{2}}{b\sqrt{1 + \frac{4}{m}}} \quad (2.114)$$

Зная, что $\frac{D}{2} - r = \frac{b}{2} = \sqrt{a^2 + r^2} - r$, можно определить a при равных радиусах шаров:

$$a = \sqrt{\frac{D^2}{4} - r^2} = \frac{b}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{m}}. \quad (2.115)$$

Подставив в уравнение (2.113) значения E_τ из (2.110) и $\frac{\partial \tau}{\partial x}$ из (2.114), для $\sigma = \pi$ получим:

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{(u_1 - u_2)\sqrt{2}ch \frac{\tau}{2}}{b\sqrt{1 + \frac{4}{m}}} \left[\frac{1}{2} sh \frac{\tau}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau}{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau_1} \times \right. \\ &\times \exp \left\{ -\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau_1(-1)^n + ch \frac{\tau}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{ch\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau}{sh\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau_1} \times \right. \\ &\left. \left. \times \exp \left\{ -\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau(-1)^n \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right) \right\} = \frac{u_1 - u_2}{b} K_1, \right. \end{aligned} \quad (2.116)$$

где K_1 – безразмерная величина, характеризующая, насколько напряженность в данном поле больше напряженности равномерного поля, при котором:

$$E = \frac{u_1 - u_2}{b} \quad (2.117)$$

Пондеромоторную силу F_r в различных токах вдоль линии $p - p'$ можно разделить, подставив в (2.110) значения координат τ и $\sigma = \pi$. С помощью (2.110) и (2.116) получим следующую зависимость:

$$f_x = \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot \frac{\partial \left[\left[E_\tau \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right]^2 + E_\sigma^2 \right]}{\partial x} =$$

$$= \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot \frac{u_1 - u_2}{b^3} K_2, \quad (2.118)$$

где K_2 – оставшаяся безразмерная часть формулы (2.118).

Выражение (2.118) характеризует пондеромоторную силу, зависящую от геометрических параметров поля и координат точки $(\tau; \sigma)$. Тогда совокупность факторов, влияющих на распыленную жидкость, можно описать моделью (2.119).

$$\left\{ \begin{aligned} & C_r(\rho_1 z) d\rho = C(\rho_1 z) \int_0^{1-\rho} C_r(\rho_1 z) dj(\rho_1 \rho) \times \frac{S(\rho_1 \rho) \Delta t d\rho_1}{\sigma \sqrt{2\pi} V(z) \sigma \sqrt{2\pi}} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} dv_z \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \exp \left[-\frac{v_r^2 + (v_z - \bar{v}_r)^2}{2\sigma^2} \right] \times \\ & \times \exp \left[-\frac{v_r^2 + (v_z - \bar{v}_r)^2}{2\sigma^2} \right] \times \sqrt{(v_r - v_{1r})^2 + (v_z - v_{1z})^2}; \\ & C'_{1,2} = C(l_1 \rho_1 z) \cdot C(l_2 \rho_2 z) \frac{S_{1,2} \Delta t}{\sigma \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\infty \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1,2} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{1z} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} dv_{2r} \int_{-\infty}^{\infty} dv_{2,z} \times \exp \left[\frac{-\bar{v}_{1,2}^2 + (v_{1z} - v_{1r})^2}{2\sigma_1^2} \right]^{-\infty} \times \\ & \times \exp \left[-\frac{v_{2z}^2 (v_{2z} - v_{1z})^2}{2\sigma^2} \right] \times \\ & \times \sqrt{(v_{1r} - v_{2r})^2 + (v_{1z} - v_{2z})^2} \cdot \frac{dl_1 dl_2 d\rho_1 d\rho_2}{V(z)}; \\ & F_r = -\frac{K\alpha}{C(\rho Z)} [C_1(\rho z) d\rho - C_2(\rho z) d\rho]; \\ & f_x = \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot \frac{\partial \left[\left[E_\tau \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right]^2 + E_\sigma^2 \right]}{\partial x} = \\ & = \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot \frac{u_1 - u_2}{b^3} K_2. \end{aligned} \right. \quad (2.119)$$

Таким образом, проведенные исследования позволяют объяснить причины, замедляющие процесс осаждения капель обрабатываемой жидкости при одновременной интенсификации абсорбции озона жидкостью при проведении обработки в электрическом поле. К примеру, из уравнения 2.106 видно, что (при расчете ponderomotorной силы) замедление капель будет прямо пропорционально напряженности поля, коэффициенту сопротивления среды (при расчете градиентной силы). Кроме этого, наложение электромагнитного поля на камеру обработки приводит к интенсификации абсорбционных процессов озона в обрабатываемую жидкость. Это можно увидеть на основании уравнения 2.119 в части, оказывающей влияние на равенство $C'_{1;2}$.

2.5 Выводы

1. Полученные в ходе исследования математические зависимости позволяют определить степень влияния конструктивных параметров газоразрядного промежутка (ширина газоразрядного промежутка и диэлектрических барьеров) на показатели емкости газоразрядного блока, коэффициента мощности, а также активной, реактивной и полной мощностей генератора озона. Анализируя полученные зависимости, установили, что изменение емкости газоразрядного промежутка в диапазоне 1–2,4 нФ, приведет к увеличению активной мощности от 110 до 420 Вт, а реактивной мощности от 301 до 885 вар, что вызовет рост коэффициента мощности с 0,344 до 0,430. Аналогичное изменение барьерной емкости приведет к более интенсивному росту показателя коэффициента мощности с 0,343 до 0,679. Таким образом, наибольшее влияние на коэффициент мощности, а, следовательно, и производительность генератора озона, оказывает барьерная емкость - величина, которой обусловлена шириной диэлектрической пластины. Также в ходе исследования установлено незначительное влияние изменения питающего напряжения на приращение коэффициента мощности, в частности при напряжении 200 В величина активной мощности составила 110 Вт, увеличение питающего напряжения до 260 В привело к росту активной мощности до уровня

324 Вт, но данное увеличение питающего напряжения привело и к росту реактивной мощности с 301 до 854 вар, прирост $\cos\varphi$ при этом составил 0,012. Незначительное увеличение $\cos\varphi$ связано с емкостным характером нагрузки генератора озона.

2. В результате теоретического исследования были получены математические модели поглощения озона в камере обработки при барботировании озона в жидкую фракцию навозных стоков и распылении жидкой фракции в газовую среду. Сравнительный анализ показал, что распыление жидкой фракции в газовую среду позволяет повысить абсорбцию O_3 в 360 раз. Воздействие электрического поля на распыленную жидкость позволяет повысить уровень абсорбции озона на 52 %.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА И ВЛИЯНИЕ ОЗОНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ВРЕДНОСНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ СТОЧНЫХ ВОД СВИНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

3.1 Экспериментальное исследование влияния конструкционных параметров разрядного устройства на электрические параметры генератора озона

Для проведения экспериментальных исследований была собрана лабораторная установка, принципиальная схема которой имеет вид, представленный на рисунке 3.1:

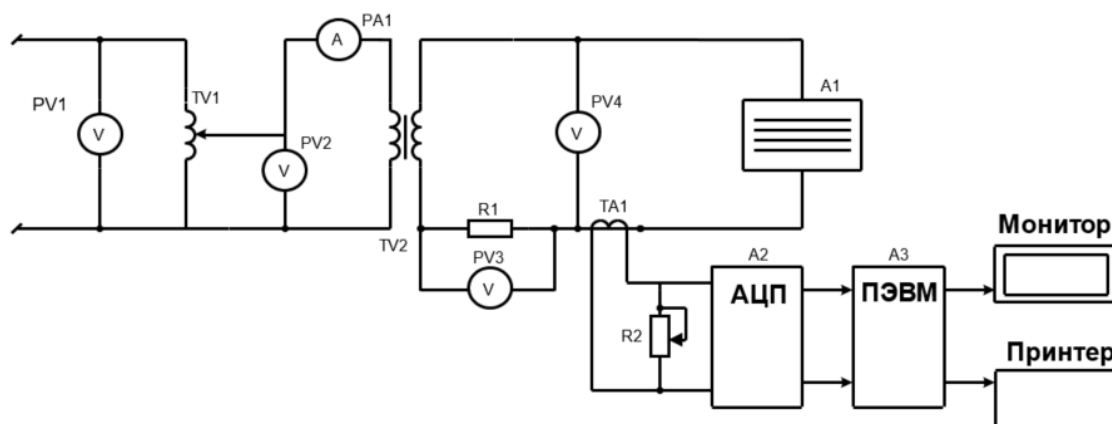


Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки для исследования параметров электроозонатора

Лабораторная установка питается от сетевого источника напряжения 220 В, для фиксации входного напряжения используем вольтметр PV1, далее напряжение поступает на лабораторный автотрансформатор TV1, с помощью которого осуществляется регулировка питающего напряжения в диапазоне 200–240 В, для фиксации напряжения и тока во вторичной цепи ЛАТР-а используем вольтметр PV2 и амперметр PA1, преобразованное напряжение поступает на первичную обмотку повышающего трансформатора TV2 с коэффициентом трансформации 0,02, фиксация напряжения во вторичной цепи повышающего трансформатора осуществляется вольтметром PV4, а величина тока определяется косвенным методом через падение напряжения (PV3) на резисторе R1, газоразрядный блок

генератора озона (А1) подключается ко вторичной обмотке повышающего трансформатора. Для снятия и фиксации динамических характеристик используем аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключенный к компьютеру. Сигнал на АЦП поступает через трансформатор тока ТА1, а для точной настройки используем реостат R2 подключенный параллельно АЦП.

Данная лабораторная установка использовалась для определения условий, при которых коэффициент мощности генератора озона достигнет максимальных значений, для этого было необходимо подобрать оптимальное сочетание конструкционных параметров газоразрядного блока. С этой целью были изготовлены газоразрядные блоки имеющие одинаковые площади диэлектрических барьеров и электродов, но ширина воздушного зазора и диэлектрической пластины отличались в пределах от 1 до 4 мм. Данный диапазон обусловлен следующими обстоятельствами, так использование воздушного зазора менее 1 мм не позволяет добиться равномерности распределения разряда на поверхности электрода и значительно увеличивает сопротивление воздуху, что не позволяет обеспечить необходимый отвод тепла от пластин, а это в свою очередь приводит к перегреву диэлектрических пластин с их последующим разрушением. Увеличение воздушного зазора более 4 мм требует значительного роста питающего напряжения для обеспечения горения разряда, не обеспечивая роста производительности, следовательно, приводит к необоснованному увеличению энергетических затрат. Использование диэлектрических пластин шириной менее 1 мм приводит к увеличению диэлектрической проницаемости выше критического уровня, что способствует образованию пробоя даже при низких уровнях питающего напряжения. В свою очередь увеличение ширины диэлектрического барьера выше 4 мм приводит к значительному росту емкостной составляющей и как следствие вызывает значительное снижение активной мощности. Помимо этого, при проведении экспериментального исследования определялось влияние напряженности электрического поля и параметров окружающей среды на производительность генератора озона.

В основу эксперимента положено получение и исследование вольтамперной характеристики генератора озона при различных конструкционных параметрах газоразрядного блока. Это связано с тем, что на основании вольтамперной характеристики могут быть определены такие параметры озонатора как: напряжение зажигания и потухания разряда, потребляемая активная мощность, емкости газоразрядного блока и другие.

В частности, активная мощность определяется из выражения:

$$P = I_{\text{ср}}^{\text{a}} \cdot U_{\Gamma}, \quad (3.1)$$

где P – активная мощность генератора озона;

$I_{\text{ср}}^{\text{a}}$ – активная часть среднего тока, протекающего через газоразрядный блок;

U_{Γ} – падение напряжения на газоразрядном промежутке.

$$I_{\text{ср}}^{\text{a}} = I_{\text{ср}} - I_{\text{ср}}^{\text{з.п.}}, \quad (3.2)$$

где $I_{\text{ср}}$ - средний ток газоразрядного блока;

$I_{\text{ср}}^{\text{з.п.}}$ – средний ток зажигания разряда.

Таким образом активная мощность может быть рассчитана:

$$P = (I_{\text{ср}} - I_{\text{ср}}^{\text{з.п.}}) \cdot U_{\Gamma}. \quad (3.3)$$

Полная мощность определяется с помощью уравнения:

$$S = I_{\text{ср}} \cdot U'. \quad (3.4)$$

где S – полная мощность генератора озона;

U' - напряжения газоразрядного блока.

Таким образом, выражение для определения коэффициента мощности примет вид:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{(I_{\text{ср}} - I_{\text{ср}}^{\text{з.п.}}) \cdot U_{\Gamma}}{I_{\text{ср}} \cdot U'}. \quad (3.5)$$

Экспериментальные исследования, описанные в источниках литературы, подтверждают наличие излома ВАХ генератора озона при зажигании разряда, а также сравнивают газоразрядный блок с тремя последовательно включенными конденсаторам, два из которых характеризуют емкость барьеров, а оставшийся емкость воздушного промежутка (опыт, проведенный при заполнении воздушного

промежутка ртутью). Также известны опыты с подключением эквивалентного конденсатора и сопротивления. Описанные опыты подтверждают теоретические исследования, приведенные во второй главе данной работы. Следовательно, можно сделать вывод о том, что экспериментальное исследование, основанное на анализе ВАХ генератора озона, позволит установить искомые параметры и определить наиболее подходящие конструкционные характеристики разрядного блока [102–106].

На начальном этапе было необходимо определить материал для изготовления диэлектрических барьеров, для этого изготовили три идентичных газоразрядных блока, которые отличались друг от друга только материалом диэлектрических пластин. В качестве диэлектриков использовали – стекло, гетинакс и стеклотекстолит, данные материалы имеют различные характеристики диэлектрической проницаемости и удельных сопротивлений. При поочередном подключении данных блоков к одному и тому же источнику питания получены следующие зависимости (рисунок 3.2):

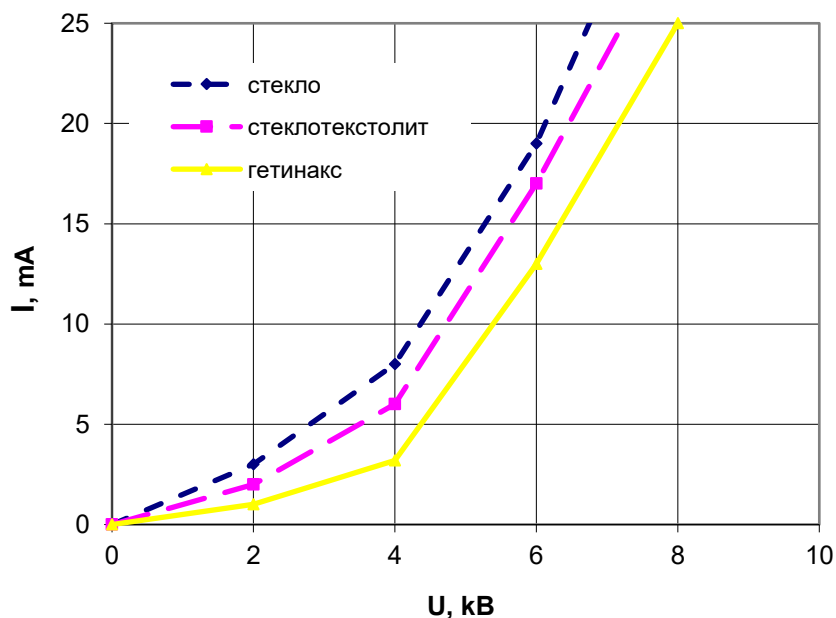


Рисунок 3.2 – ВАХ разрядного блока с различными материалами диэлектрических барьеров

Полученные характеристики показывают преимущество использования диэлектрических барьеров, выполненных из стекла перед другими. Полученный

результат объясняется различной диэлектрической проницаемостью используемых в эксперименте материалов. Как отмечалось ранее, при горящем разряде ток, протекающий через газоразрядный промежуток, зависит от барьерной емкости, а она увеличивается с увеличением диэлектрической проницаемости материала. Таким образом, увеличение диэлектрической проницаемости вызывает рост тока при горящем разряде.

Полученные данные, представленные в виде графика (рисунок 3.2), показывают рост тока при одном и том же напряжении на газоразрядном блоке, выполненном из стекла по сравнению с блоками, выполненными из стеклотекстолита и гетинакса. Так при уровне напряжения 6 кВ уровень тока, протекающего через блок, выполненный из стекла (19 мА) в 1,5 выше, чем у блока, выполненного из гетинакса (13 мА) и 1,2 раза выше, чем у блока с диэлектрическими пластинами из стеклотекстолита (17 мА). Следовательно, можно сделать вывод о том, что использование стекла для изготовления диэлектрических барьеров генератора озона более приемлемо по сравнению с другими исследованными материалами.

Определив наиболее подходящий материал для изготовления диэлектрических пластин разрядного блока нами проведен ряд опытов, направленных на определение влияния ширины диэлектрических пластин и газоразрядного промежутка на электрические параметры генератора озона. Результаты исследований представлены в виде графиков.

На рисунке 3.3 представлены вольтамперные характеристики при различной ширине воздушного промежутка от 1 до 4 мм, при постоянной ширине диэлектрических барьеров 2 мм. Анализ характеристики показывает значительное увеличение тока при уменьшении ширины воздушного промежутка, так при напряжении 6 кВ уровень тока при ширине воздушного зазора 1 мм более чем в 2 раза превышает уровень тока при ширине воздушного зазора – 4 мм. Таким образом, при ширине воздушного зазора равной 1 мм нами получена наибольшая мощность при равных напряжениях. Изменение наклона характеристик, при увеличении воздушного зазора, прежде всего связано с изменением газовой среды

воздушного промежутка, чем меньше промежуток, тем более концентрированы разряды, что оказывает влияние на величину сопротивления воздушного промежутка. Также необходимо отметить – уменьшение воздушного промежутка отрицательно влияет на отвод тепла от разрядного блока, что в последствии может оказать негативное воздействие на прочностные характеристики диэлектрических барьеров.

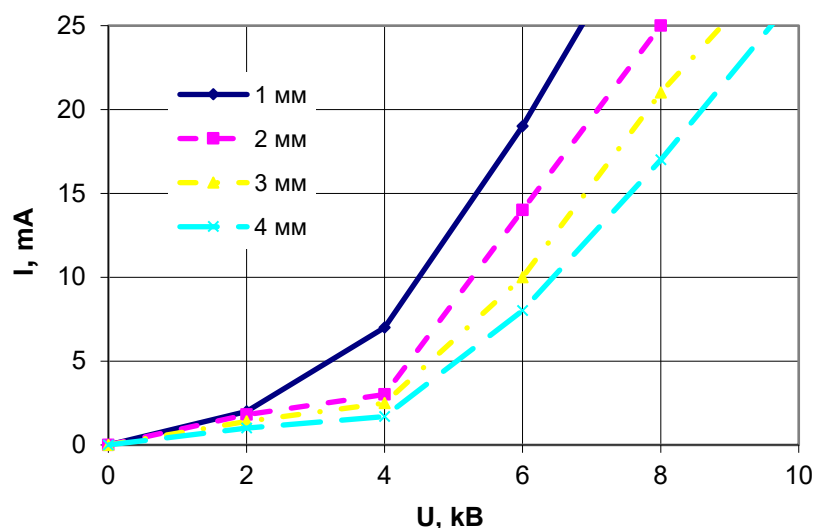


Рисунок 3.3 – ВАХ разрядного блока с различной шириной воздушного промежутка

Анализ полученных данных говорит о непосредственном влиянии ширины воздушного промежутка газоразрядного блока генератора озона на величину тока и как следствие на мощность и производительность разрабатываемого устройства. При условии постоянства величины напряжения, подводимого к разрядному блоку (например 8 кВ), наблюдаются следующие изменения величины тока при изменении ширины воздушного зазора: 4 мм – 17 мА; 3 мм – 21 мА; 2 мм – 25 мА; 1 мм – 33 мА. Рост тока при уменьшении воздушного зазора можно объяснить снижением уровня активного сопротивления разрядного промежутка, данная взаимосвязь описана во 2 главе данной работы.

Рассмотрим влияние ширины диэлектрических барьеров на активную мощность генератора озона при различных уровнях напряжения, приложенного к газоразрядному блоку. Результаты экспериментального исследования представим в виде графической зависимости на рисунке 3.4.

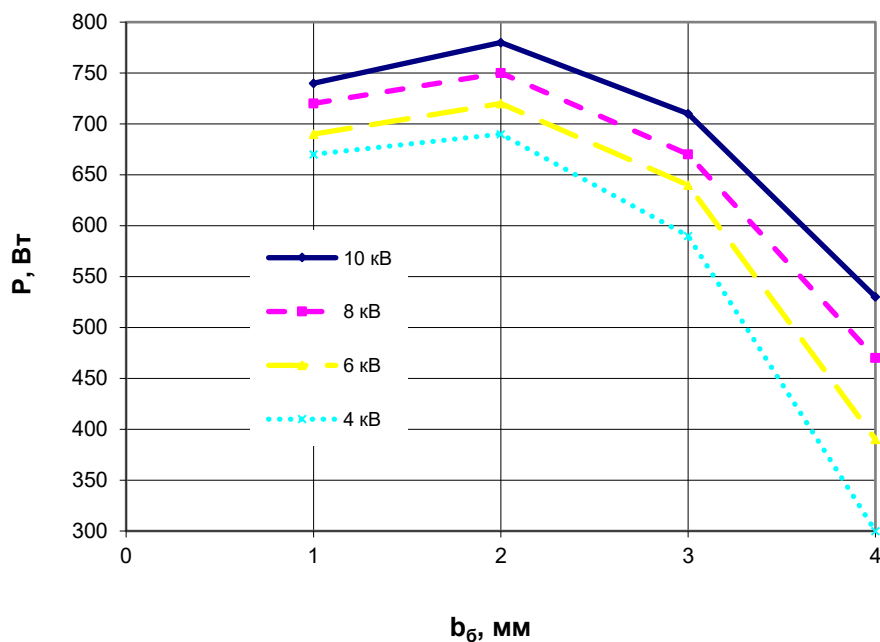


Рисунок 3.4 – Влияние ширины диэлектрического барьера (b_6) на активную мощность газоразрядного блока генератора озона при различных уровнях приложенного напряжения

Из представленного графика видно, что наибольшие значения активной мощности были достигнуты при всех уровнях напряжения на разрядном блоке с шириной диэлектрического барьера 2 мм. Увеличение активной мощности при увеличении ширины диэлектрического барьера от 1 до 2 мм связано со снижением барьерной емкости. Дальнейшее увеличение ширины барьера способствует снижению емкостной составляющей, но и вызывает снижение диэлектрической проницаемости, что в свою очередь снижает количество носителей заряда на поверхности диэлектрика и как следствие приводит к уменьшению тока и активной мощности. Таким образом, наиболее целесообразно использовать для изготовления барьеров стекло шириной от 1 до 2 мм. Также необходимо отметить, что в процессе проведения опыта разрядные блоки с шириной диэлектрического барьера 1 мм выходили из строя при непродолжительном использовании, время непрерывной работы исследуемых объектов до разрушения (пробоя) не превышало 6 часов. Это обстоятельство не позволяет рекомендовать для использования в системах очистки навозных стоков пластинчатые озонаторы, у которых ширина диэлектрического

барьера, выполненного из стекла менее 2 мм. В остальных случаях разрядные блоки выдерживали непрерывное включение на протяжении 12 часов.

Опираясь на проведенные исследования, можно сделать вывод, что наиболее подходящим вариантом для создания газоразрядного блока генератора озона, который будет использован в установке для комплексной очистки навозных стоков, будет устройство со следующими характеристиками: материал диэлектрических барьеров – стекло; ширина воздушного зазора – 1–2 мм; ширина диэлектрических пластин – 2 мм. На основании данного заключения был сконструирован газоразрядный блок, который исследовался на предмет достижения максимального уровня коэффициента мощности при плавном регулировании питающего напряжения. Результаты исследования представлены на рисунке 3.5:

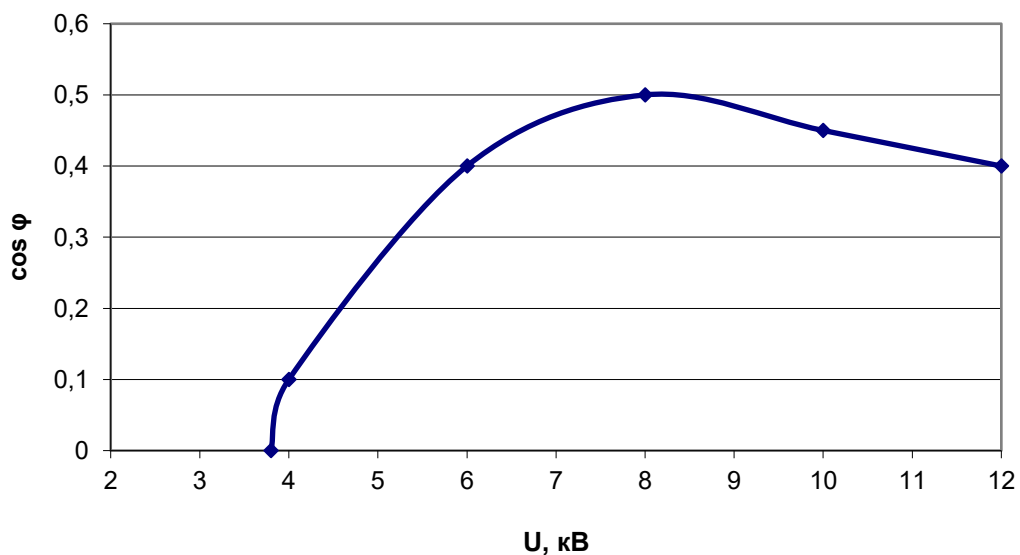


Рисунок 3.5 – Влияние приложенного напряжения на коэффициент мощности газоразрядного блока генератора озона

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что наибольшего коэффициента мощности ($\cos\varphi=0,5$) для сконструированного газоразрядного блока можно добиться при подаче питающего напряжения 8–8,5 кВ. Максимальный уровень коэффициента мощности соответствует максимальной активной мощности, а, следовательно, и максимальной производительности генератора озона.

3.2 Описание экспериментальной электротехнологической установки для изучения влияния озона на вредоносные микроорганизмы сточных вод

Экспериментальные исследования по влиянию озоновоздушной обработки на органолептические свойства, микробиологическую и биологическую загрязненность проводились в течении двух лет (2014–2016 гг.) в лабораторных и производственных условиях животноводческих предприятий Краснодарского края. Для проведения исследования была сконструирована экспериментальная установка – «Станция очистки навозных стоков», технологическая схема которой представлена на рисунке 3.6.

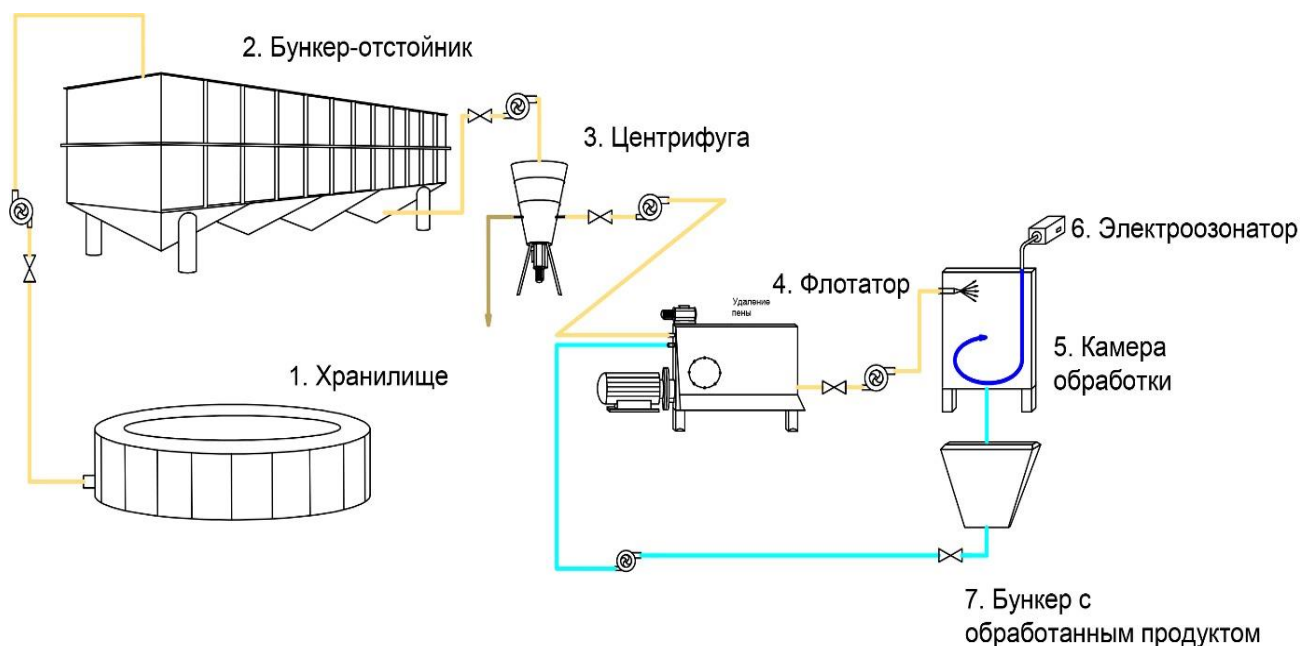


Рисунок 3.6 – Технологическая схема станции очистки навозных стоков

Технологический процесс на станции осуществлялся следующим образом: на первом этапе навоз подвергается механической очистке. Из навозоприемника, куда сливались стоки из корпуса свиноводческого комплекса, отходы поступали на шнековый сепаратор. В эксперименте использовался сепаратор с размером ячейки сита 0,5 мм. На рисунке 3.7 представлен внешний вид устройства. По итогам механической обработки удается разделить отходы на 2 фракции:

- жидкая фракция с содержанием сухих веществ – 1,46 %;

– твердая фракция с содержанием взвешенных веществ и органических загрязнений с остаточной связанной влагой – 70 %.



Рисунок 3.7 – Шнековый сепаратор с размером ячейки сита 0,5 мм

Твердая фракция (рисунок 3.8) подвергалась этапу биологической очистки. После сбора и подготовки, навоз отправлялся на компостирование.



Рисунок 3.8 – Твердая фракция разделенного навоза

Этот метод биологической очистки является наиболее распространенным. Эффект достигается за счет смешивания навоза с углеродосодержащими материалами (солома, опилки) [87]. Биологическая очистка свиного навоза уменьшает негативное воздействие на окружающую среду, позволяет получить компост и биогаз, которые могут использоваться в сельском хозяйстве. Жидкая фракция навоза сливалась в бункер-накопитель.

На бетонном перекрытии бункера-накопителя была установлена станция очистки навозных стоков (в дальнейшем по тексту «СО»), внешний вид которой представлен на рисунке 3.9. Отличительной особенностью станции является то, что в ней осуществляется комплексный подход очистки жидкой фракции навоза.



Рисунок 3.9 – Внешний вид станции очистки навозных стоков

Из бункера-накопителя отжатая жидкость погружным насосом (рисунок 3.10) по гибкому трубопроводу через быстросъемные соединения (рисунок 3.11) подавалась в приемный трубопровод станции очистки (рисунок 3.10). Производительность насоса – 8 м³.



Рисунок 3.10 – Погружной насос



Рисунок 3.11 – Подключение подачи и слива

В рабочих камерах станции очистки навозные стоки проходили 5 этапов комплексной очистки без применения фильтрующих материалов и химических препаратов. Необходимо отметить, что при работе станции очистки не образуются отходы и иные негативные составляющие. Одним из способов очистки, входящих

в состав станции очистки, является флотация. На рисунке 3.12 представлен внешний вид флотационной камеры во время работы.



Рисунок 3.12 – Флотационная камера

На рисунке 3.13 представлены механические включения и коллоидные составляющие, выделенные из стоков. В ходе проведенных исследований было выявлено, что механическая обработка снижает содержание взвешенных и коллоидных частиц, вероятно органического происхождения, но не снижает бактерицидную обсемененность стоков [83].

При этом в навозоприемнике и бункере-накопителе отжатой жидкости создавалась специфическая поверхностная пена (рисунок 3.14), которая препятствовала выделению аммиака и др. летучих веществ в атмосферу, существенно снижая специфический запах навоза на всем участке накопления и разделения навоза [92].

Из бункера-накопителя с помощью насоса отжатая жидкость поступала в камеру обработки озоновоздушной смесью [88]. Поступающая жидкость распылялась внутри камеры озоновоздушной обработки с помощью форсунки расположенной в верхней части камеры.



Рисунок 3.13 – Вещества, выделенные из жидкой фракции навоза после сепаратора



Рисунок 3.14 – Поверхностная пена с «жесткой» структурой и активным веществом в бункере-накопителе отжатой жидкости

Исходя из данных полученных в результате анализа литературных источников и теоретических исследований установлены основные факторы, влияющие на микробиологическую обсемененность сточных вод при обработке озонозвоздушной смесью. К данным факторам относятся: концентрация озона, время обработки и температура внутри камеры [12, 13, 17, 18, 24].

Таким образом экспериментальное исследование проводилось с различными концентрациями озона с целью выявить влияние концентрации на обсемененность сточных вод. x_1 -концентрация озона в камере обработки: 1 – 50 мг/м³; 2 – 250 мг/м³; 3 – 440 мг/м³; 4 – 640 мг/м³.

Концентрацию измеряли в геометрическом центре камеры обработки. Время обработки (x_2) засекали с момента достижения необходимой концентрации озона внутри камеры (в зависимости от необходимой концентрации через 2–4 мин. после начала работы генератора озона). Обработка проводилась при следующих значениях экспозиции: 1 – 0,5 часа; 2 – 1,0 час; 3 – 1,5 часа; 4 – 2,0 часа.

Для отслеживания влияния температуры окружающей среды на процесс озонирования навозных стоков, обработку производили в разное время суток, что позволило исследовать диапазон температур от +10 °С до +25 °С. Температуры при которых производилась обработка: 1 – 12 °С; 2 – 16 °С; 3 – 20 °С; 4 – 24 °С.

После прохождения через рабочие участки СО навозные стоки сливались в накопитель очищенных стоков (рисунок 3.15) или в контрольную емкость (рисунок 3.16).



Рисунок 3.15 – Бетонный накопитель стоков

Станция очистки работала в непрерывном автоматическом режиме с производительностью 4 м³ в час по очищенным стокам.

Общая эксплуатационная электрическая нагрузка СО – 6 кВт.

Забор проб проводился в контрольной емкости (рисунок 3.15) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51592-2000 и ГОСТ Р 51593-2000, регламентирующими отбор водных проб. Санитарно-микробиологический анализ сточных вод выполнялся по показателям СанПиН 2.1.5.980-00, включая общие и

термотолерантные колиформы, колифаги, возбудителей кишечных инфекций (сальмонеллы, энтеровирусы и др.).



Рисунок 3.16 – Контрольная емкость объемом 2,14 м³

Контроль качества обработки сточных вод осуществлялся путем периодического отбора проб и последующего проведения биохимических и микробиологических исследований. Основным оценочным параметром эффективности обработки выбран уровень микробиологической обсемененности, в то время как органолептические показатели использовались как вспомогательные [3].

Для проведения исследований станция очистки навозных стоков была установлена на свиноводческом комплексе ООО «Новые аграрные технологии» хутора «Бейсужек второй».

3.3 Исследование влияния озоновоздушной смеси на выживаемость стафилококков, находящихся в жидкой фракции навозных стоков

На основании предварительных данных, полученных в ходе поисковых экспериментов, проведенных в производственных и лабораторных условиях, было принято решение о проведении полнофакторного эксперимента. Для этого жидкая

фракция навозных стоков подвергалась озонвоздушной обработке по следующей схеме: четыре уровня концентрации озона при четырех уровнях экспозиции [8, 9]. Помимо этого, для определения влияния температуры на процесс обеззараживания экспериментальное исследование провели при четырех уровнях температуры окружающей среды. Каждый вариант экспериментального исследования имел четырехкратную повторность.

Данные экспериментального исследования выживаемости стафилококков в результате воздействия озона при температуре 12 °С сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (стафилококки) при 12 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Сред. знач. тыс. кл./гр (y ₁)
1	50	0,5	1560	1575	1570	1550	1564
2	50	1	600	620	610	590	605
3	50	1,5	70	75	72	68	71
4	50	2	0	0	0	0	0
5	250	0,5	1080	1060	1070	1075	1071
6	250	1	400	408	405	402	404
7	250	1,5	0	0	0	0	0
8	250	2	0	0	0	0	0
9	450	0,5	780	772	760	765	769
10	450	1	150	145	148	151	148
11	450	1,5	0	0	0	0	0
12	450	2	0	0	0	0	0
13	650	0,5	400	391	395	389	394
14	650	1	0	0	0	0	0
15	650	1,5	0	0	0	0	0
16	650	2	0	0	0	0	0
контроль			5000	5000	5000	5000	5000

Для наглядности и удобства обработки данных, результаты эксперимента были представлены в виде графика (рисунок 3.17).

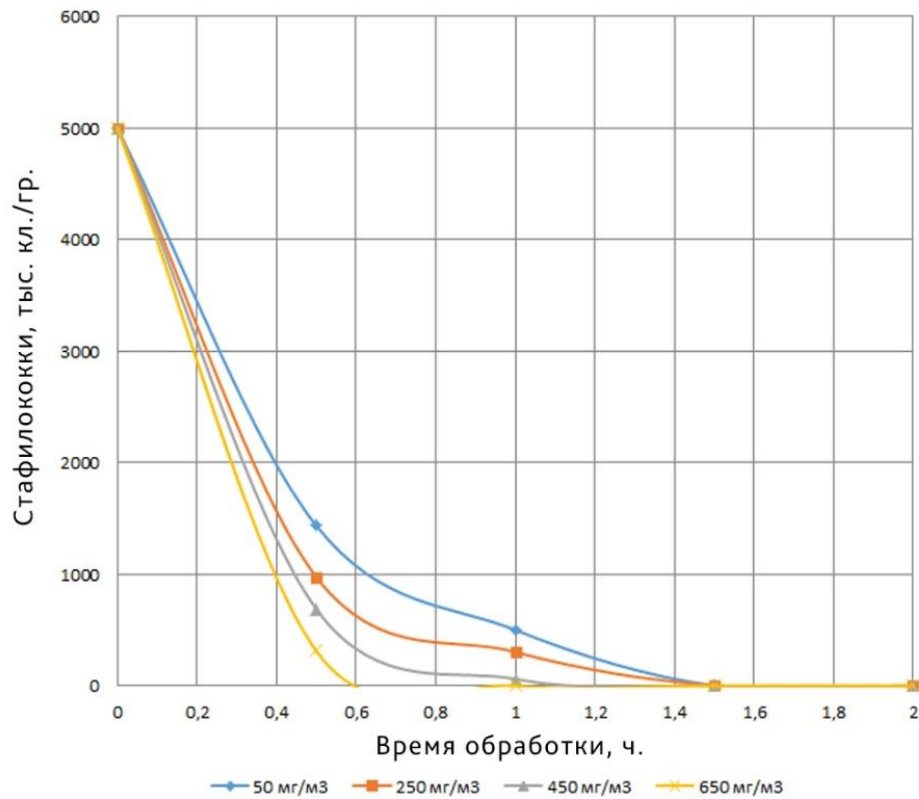


Рисунок 3.17 – График изменения выживаемости стафилококков от времени обработки при заданных концентрациях озона и температуре 12 °С

Анализ полученных результатов показывает, что нулевой порог выживаемости стафилококков достигается при любом из уровней концентрации озона, но при различных уровнях экспозиции. Так при концентрации озона 50 мг/м³ полное уничтожение стафилококков наступает после двухчасового воздействия, а при 650 мг/м³ этот же показатель может быть достигнут при воздействии в течении одного часа [52]. Помимо этого, необходимо отметить, что за первые 30 минут озонвоздушного воздействия количество стафилококков снижается более интенсивно чем при дальнейшей обработке. Представленные данные фиксируют снижение показателя при 50 мг/м³ в 3,2 раза, при 250 мг/м³ в 4,7 раза, при 450 мг/м³ в 6,5 раз и 600 мг/м³ в 12,6 раза.

На основе исследований (таблица 3.1) построена поверхность (рисунок 3.18) и получено уравнение множественной регрессии, показывающее влияние концентрации озона (x_1) и времени обработки (x_2) на выживаемость стафилококков (y_1).

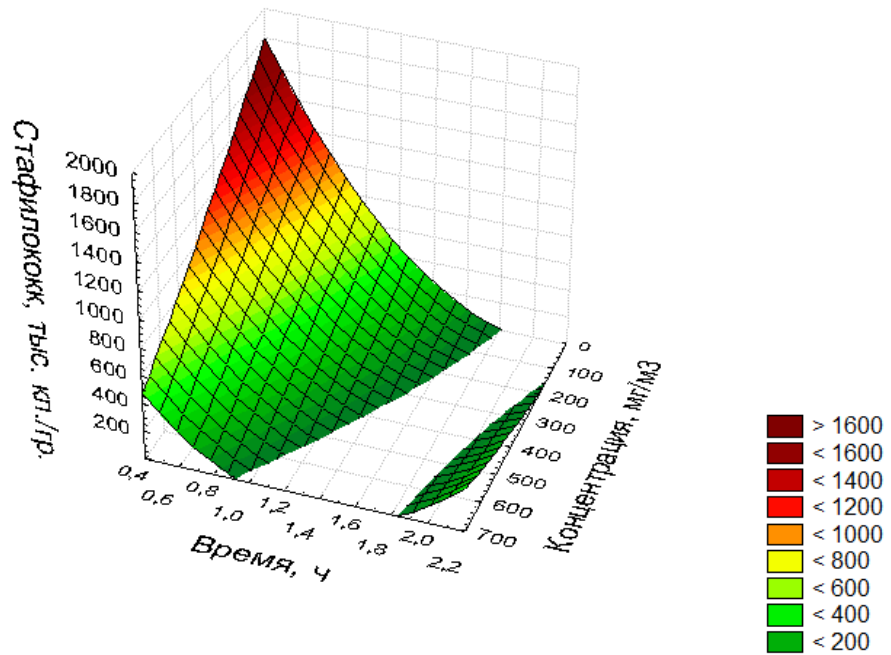


Рисунок 3.18 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на выживаемость стафилококков (y_1) при температуре 12 °С

Проведенный анализ экспериментально полученных значений зависимой переменной y_1 и предполагаемых значений данной переменной регрессионной моделью графически изображен на рисунке 3.19.

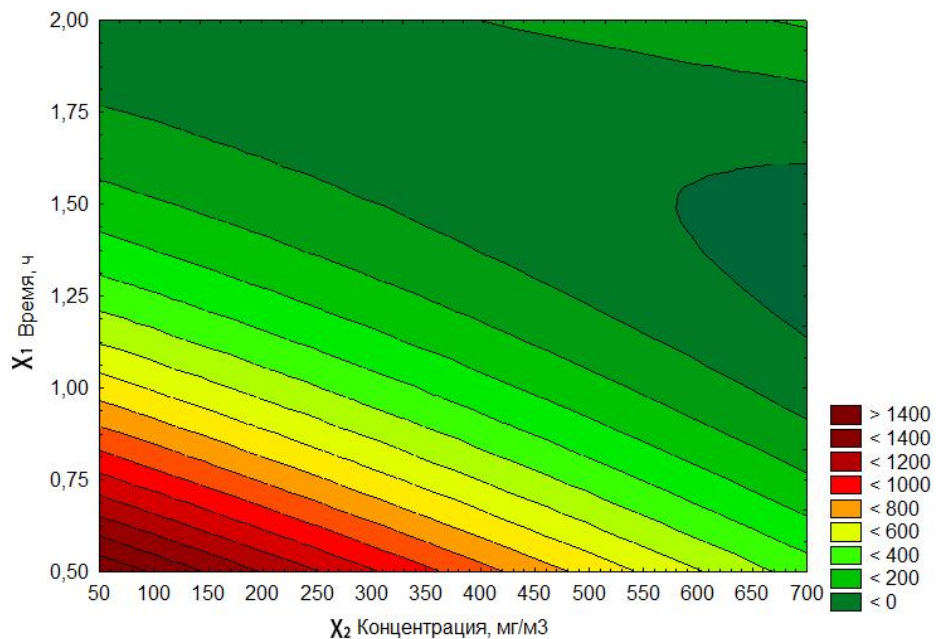


Рисунок 3.19 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на проекцию поля выживаемости стафилококков (y_1)

Данные, полученные в ходе экспериментального исследования, были обработаны с помощью методов математической статистики в программе Statistika 6.0. Достоверность результатов исследований проводилась с помощью статистики Дарбина-Уотсона.

На базе регрессионного анализа получена модель, которая в общем виде будет представлена в виде полинома второй степени:

$$y_i = b_0 - b_1 \cdot x_1 - b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1^2 + b_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_5 \cdot x_2^2, \quad (3.6)$$

где $b_0 \dots b_5$ – коэффициенты модели

Результаты проведенного регрессионного анализа приведены в таблице 3.2. (температура окружающей среды 12 °С).

Таблица 3.2 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость стафилококков при температуре окружающей среды 12 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R = 0,99$ $R^2 = 0,98$; $F(5,10) = 137,85$ $p < 0,000001$;						
	<i>Beta</i> - коэффициен т	Стандартная ошибка для <i>Beta</i> - коэффициент а	<i>B</i> - коэффициен т	Стандартная ошибка для <i>B</i> - коэффициент а	Критерий Стьюдент а $t(3)$	p – уровень вероятност и
Ша г			2772,98	120,5159	23,0092	0,000000
x_1	-1,32027	0,174586	-2,69	0,3555	-7,5623	0,000019
x_2	-3,30940	0,222770	-2695,54	181,4479	-14,8557	0,000000
$x_1 x_2$	1,06090	0,109931	1,33	0,1378	9,6506	0,000002
x_1^2	0,13416	0,152739	0,000378	0,0004	0,8784	0,400350
x_2^2	2,00335	0,214761	642,50	68,8767	9,3283	0,000003

В результате проведенного исследования получено уравнение регрессии:

$$y_1 = 2772,9766 - 2,6884 \cdot x_1 - 2695,54 \cdot x_2 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 1,3294 \cdot x_1 \cdot x_2 + 642,5 \cdot x_2^2. \quad (3.7)$$

Уравнение описывает влияние параметров электроозонной обработки на выживаемость патогенных микроорганизмов (стафилококки). Коэффициент детерминации составил свыше 85 %.

Адекватность представленного уравнения подтверждают рассчитанные критерии Фишера, а проверка значимости по критерию Стьюдента показала, что ошибка абсолютных значений не превышает 0,1.

Аналогичным образом определялось влияние озонвоздушной обработки на содержание стафилококков в жидкой фракции навозных стоков свиноводческой фермы при температуре окружающей среды 16 °С. Полученные результаты сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (стафилококки) при 16 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Сред. знач. тыс. кл./гр (y ₁)
1	50	0,5	1510	1530	1505	1500	1511
2	50	1	550	555	558	544	552
3	50	1,5	16	10	8	9	11
4	50	2	0	0	0	0	0
5	250	0,5	1040	1035	1040	1043	1039
6	250	1	360	365	358	362	361
7	250	1,5	0	0	0	0	0
8	250	2	0	0	0	0	0
9	450	0,5	740	755	750	752	749
10	450	1	110	115	121	118	116
11	450	1,5	0	0	0	0	0
12	450	2	0	0	0	0	0
13	650	0,5	350	361	365	358	358
14	650	1	0	0	0	0	0
15	650	1,5	0	0	0	0	0
16	650	2	0	0	0	0	0
контроль			5000	5000	5000	5000	5000

Проанализировав данные, представленные в таблице 3.3, можно сделать вывод, о том, что минимальное значение выживаемости стафилококков при температуре воздуха 16 °С достигается при времени обработки 36 минут и

концентрации озона 650 мг/м^3 . При обработке, с принятой наименьшей в ходе исследований, концентрацией озона 50 мг/м^3 , минимальное значение выживаемости стафилококков достигается при времени обработки 90 минут. Полученные данные говорят о увеличении эффективности использования озона в борьбе со стафилококками при увеличении температуры окружающей среды. Интенсивность сокращения популяции стафилококков наглядно показана на графической зависимости рисунок 3.20.

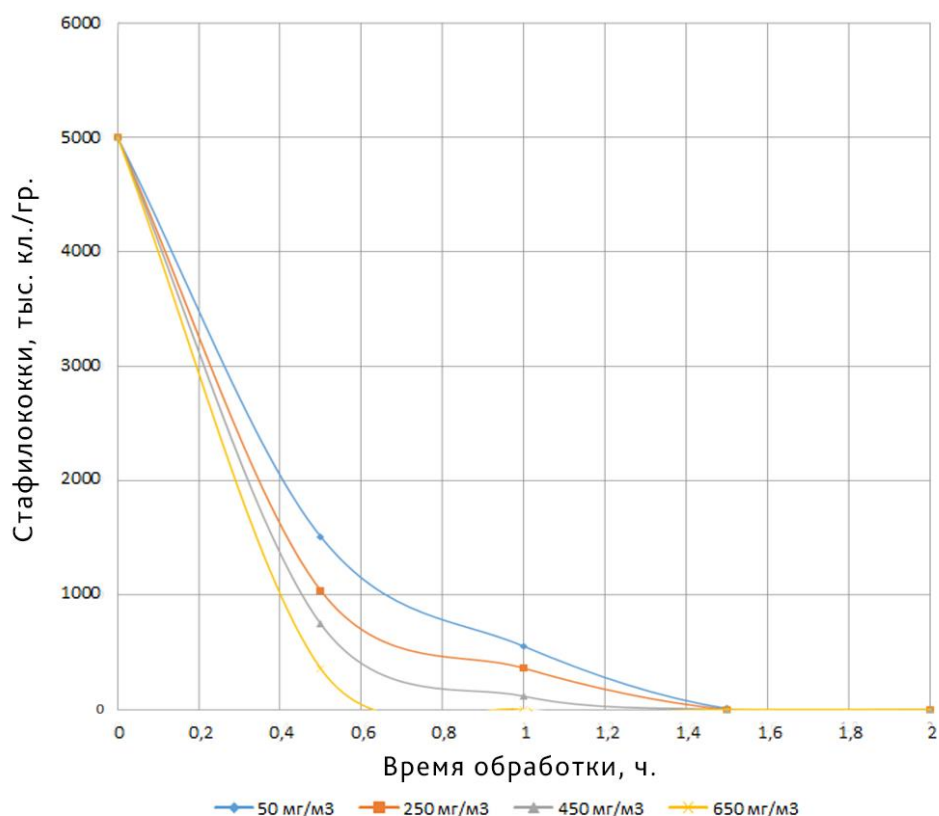


Рисунок 3.20 – График зависимости выживаемости стафилококков от времени обработки озоновоздушной смесью с заданной концентрацией озона при температуре $16 \text{ }^\circ\text{C}$

Данные, представленные в таблице 3.3, подвергались статистической обработке, с целью получения регрессионной модели. Результатом регрессионного анализа, данные для которого представлены в таблице 3.4, является полученное уравнение регрессии, которое приняло вид:

$$y_1 = 2703,0406 - 2,5296 \cdot x_1 - 2696,54 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_1^2 + 1,3124 \cdot x_1 \cdot x_2 + 655 \cdot x_2^2. \quad (3.8)$$

Таблица 3.4 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость стафилококков при температуре окружающей среды 16 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R= 0,99$ $R^2= 0,98$; $F(5,10) = 99,317$ $p<0,000001$;						
	$Beta$ - коэффициент	Стандартная ошибка для $Beta$ - коэффициент	B - коэффициент	Стандартная ошибка для B - коэффициент	Критерий Стьюдента $t(3)$	p – уровень вероятности
Шаг			2703,04	137,4083	19,6716	0,000000
x_1	-1,28007	0,205112	-2,53	0,4053	-6,2408	0,000096
x_2	-3,41134	0,261721	-2696,54	206,8809	-13,0343	0,000000
x_1x_2	1,07919	0,129152	1,31	0,1571	8,3559	0,000008
x_1^2	0,09369	0,179446	0,00026	0,0005	0,5221	0,612978
x_2^2	2,10445	0,252312	655,00	78,5309	8,3407	0,000008

Полученная регрессионная модель описывает влияние параметров озонирования навозных стоков на выживаемость стафилококков. С ее помощью были построены поверхности (рисунок 3.21, 3.22).

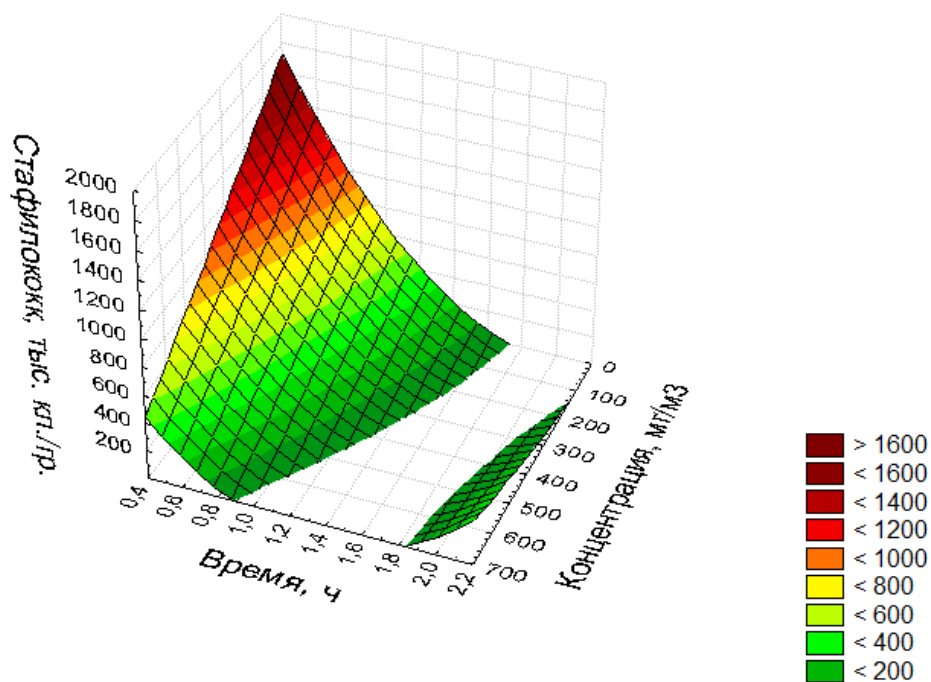


Рисунок 3.21 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на выживаемость стафилококков (y_1) при температуре 16 °С

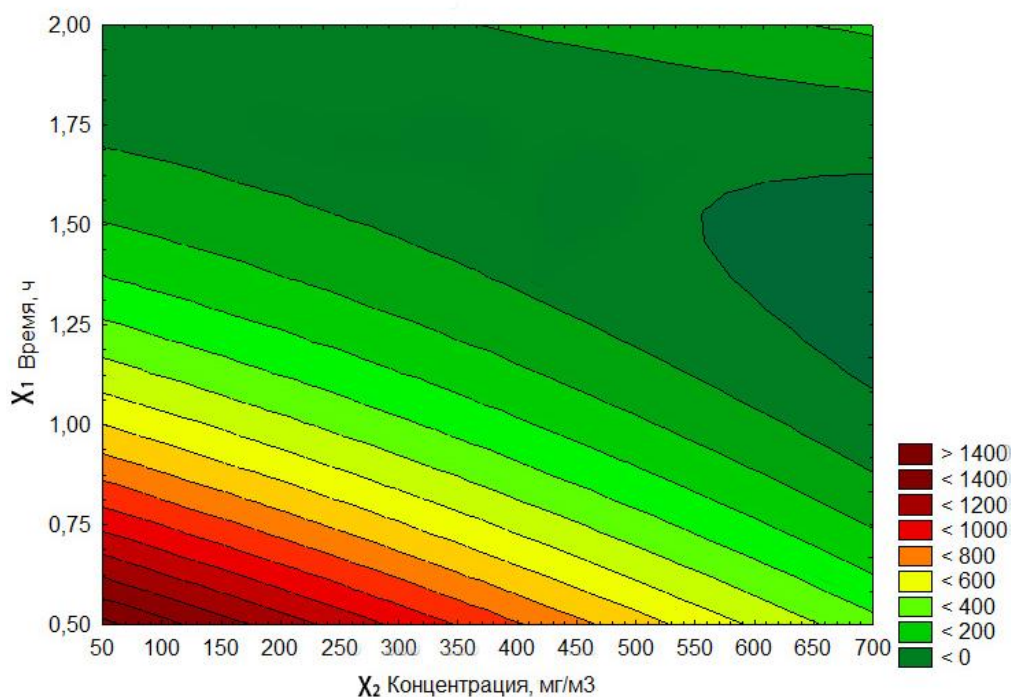


Рисунок 3.22 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на проекцию поля выживаемости стафилококков (y_1) при температуре окружающей среды 16 °С

Сравнив данные, полученные в результате экспериментального исследования и расчета регрессионной модели, можно говорить о их высокой сходимости. Уровень коэффициента детерминации оставался выше 85 %, что указывает на высокое качество модели. Критерий Фишера подтвердил ее адекватность – расчетное значение (99,32) значительно превышает табличное (5,10). Критерий Стьюдента помог исключить незначимые параметры. Модель точно воспроизводит данные с ошибкой не более 0,1. Таким образом, модель является статистически надежной и точной. Следовательно, модель можно использовать для теоретического определения влияния озона на содержание стафилококков в жидкой фракции навозных стоков при температуре окружающей среды 16 °С.

Следующим шагом рассмотрим данные, полученные в ходе озоноздушной обработки жидкой фракции навозных стоков свиноводческой фермы при температуре окружающей среды 20 °С, которые представлены в виде таблицы 3.5.

Таблица 3.5 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (стафилококки) при температуре 20 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Сред. знач. тыс. кл./гр (y ₁)
1	50	0,5	1450	1440	1462	1456	1452
2	50	1	510	520	525	522	519
3	50	1,5	0	0	0	0	0
4	50	2	0	0	0	0	0
5	250	0,5	990	995	985	987	989
6	250	1	320	325	328	330	326
7	250	1,5	0	0	0	0	0
8	250	2	0	0	0	0	0
9	450	0,5	695	704	710	708	704
10	450	1	90	88	84	91	88
11	450	1,5	0	0	0	0	0
12	450	2	0	0	0	0	0
13	650	0,5	320	328	325	330	326
14	650	1	0	0	0	0	0
15	650	1,5	0	0	0	0	0
16	650	2	0	0	0	0	0
контроль			5000	5000	5000	5000	5000

Проанализировав данные, представленные в таблице 3.5, можно сделать вывод о положительной тенденции уничтожения санитарно-показательных бактерий (стафилококков) при увеличении температуры. Также необходимо отметить, что при температуре 20 °С нулевой порог содержания стафилококков в жидкой фракции навозных стоков свиноводческой фермы достигается в течении 90 минут воздействия на уровнях концентрации 50 мг/м³, 250 мг/м³ и 450 мг/м³, а при концентрации 650 мг/м³ данный порог был достигнут через 1 час. Таким образом, с экономической точки зрения, наиболее эффективной обработкой можно считать воздействие озонозодушной смесью с концентрацией озона 50 мг/м³, так как получение данной концентрации озона менее энергозатратно и не требует значительных капитальных вложений.

Данные, представленные в таблице 3.5 подвергались регрессионному анализу, результаты которого сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость стафилококков при температуре окружающей среды 20 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R= 0,99$ $R^2= 0,98$; $F(5,10) = 86,59054$ $p<0,000001$;						
	$Beta$ - коэффициент	Стандартная ошибка для $Beta$ - коэффициента	B - коэффициент	Стандартная ошибка для B - коэффициента	Критерий Стьюдента $t(3)$	p – уровень вероятности
Шаг			2597,11	140,5848	18,4736	0,000000
x_1	-1,31602	0,219350	-2,49	0,4147	-5,9996	0,000132
x_2	-3,43937	0,279889	-2600,99	211,6635	-12,2883	0,000000
x_1x_2	1,09880	0,138118	1,28	0,1607	7,9556	0,000008
x_1^2	0,11345	0,191903	0,00030	0,0005	0,5912	0,567515
x_2^2	2,13084	0,269827	634,50	80,3464	7,8971	0,000013

В результате проведенного статистического исследования получена регрессионная модель, представленная уравнением:

$$y_1 = 2597,1109 - 2,4881 \cdot x_1 - 2600,99 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_1^2 + 1,2784 \cdot x_1 \cdot x_2 + 634,5 \cdot x_2^2. \quad (3.9)$$

Адекватность представленного уравнения подтверждают рассчитанные критерии Фишера, а проверка значимости по критерию Стьюдента показала, что ошибка абсолютных значений не превышает 0,1.

Для визуализации полученных расчетов была построена поверхность (рисунок 3.23).

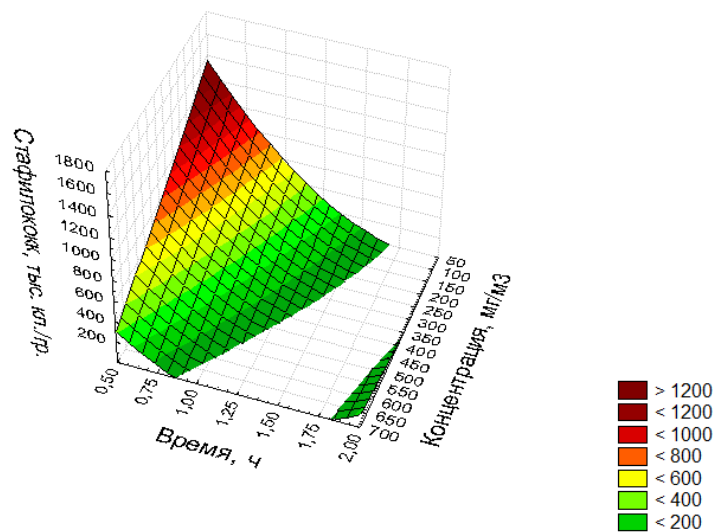


Рисунок 3.23 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на выживаемость стафилококков (y_2) при температуре 20 °С

Завершающим этапом экспериментального исследования по определению влияния озона на стафилококки, содержащиеся в жидкой фракции навозных стоков свиноводческой фермы, была обработка с разными уровнями концентрации и экспозиции при постоянной температуре окружающей среды 24 °С. Результаты исследования сведены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (стафилококки) при температуре 24 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Стафилококки, тыс. кл./гр.	Сред. знач. тыс. кл./гр (y ₁)
1	50	0,5	1440	1430	1435	1437	1435
2	50	1	490	500	512	498	500
3	50	1,5	0	0	0	0	0
4	50	2	0	0	0	0	0
5	250	0,5	980	972	975	974	975
6	250	1	300	305	298	308	303
7	250	1,5	0	0	0	0	0
8	250	2	0	0	0	0	0
9	450	0,5	688	689	686	690	688
10	450	1	60	55	65	58	59.5
11	450	1,5	0	0	0	0	0
12	450	2	0	0	0	0	0
13	650	0,5	305	315	310	318	312
14	650	1	0	0	0	0	0
15	650	1,5	0	0	0	0	0
16	650	2	0	0	0	0	0
контроль			5000	5000	5000	5000	5000

Анализ данных представленных в таблицах 3.1, 3.3, 3.5 и 3.7 показывает снижение остаточного количества стафилококков при заданных вариациях концентрации озона и экспозиции обработки при увеличении температуры окружающей среды в диапазоне 12–24 °С, но необходимо отметить что данное снижение не превышает 25 % порог для концентрации озона 250 мг/м³, 20 % порог при концентрации 650 мг/м³ и 10 % порог при концентрации 450 мг/м³. Также необходимо отметить, что увеличение температуры до 20 °С и выше позволило

снизить содержание стафилококков при обработке озоновоздушной смесью с концентрацией озона 50 мг/м^3 на всех уровнях экспозиции до нуля. Таким образом, нулевой порог содержания стафилококков в навозных стоках при температурах 20 и $24 \text{ }^\circ\text{C}$ был достигнут после полуторачасовой обработки на всех уровнях концентрации кроме 650 мг/м^3 , при данной концентрации нулевое содержание стафилококков наблюдалось уже через час после начала обработки. Допустимый уровень содержания стафилококков (ниже 60) был достигнут при следующем варианте озоновоздушной обработки: концентрация озона – 450 мг/м^3 , экспозиция – 1 час, температура окружающей среды – $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, можно заключить, что увеличение температуры окружающей среды увеличивает интенсивность взаимодействия озона с бактериями, находящимися в навозных стоках, и не снижает эффективность применения озона для борьбы со стафилококком за счет ускорения его полураспада.

Регрессионный анализ данных, представленных в таблице 3.7 позволил получить регрессионную модель влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость стафилококков при температуре $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Регрессионная модель представлена в виде неравенства (3.10), а результаты регрессионного анализа представлены в виде таблицы 3.8.

$$y_1 = 2573,6602 - 2,5055 \cdot x_1 - 2591,41 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_1^2 + 1,2711 \cdot x_1 \cdot x_2 + 636,75 \cdot x_2^2. \quad (3.10)$$

Из данных таблицы 3.8 видно, что каждый изучаемый фактор в отдельности не имеет значительного влияния на переменную y_1 тогда как их взаимосвязь является весомым показателем в борьбе с санитарно-показательными бактериями. Расчет критерия Фишера подтвердил адекватность построенной модели.

Проведена проверка значимости оценок параметров модели по критерию Стьюдента, незначимые параметры были убраны. В ходе испытаний модели, установлено, что она воспроизводит абсолютные значения с ошибкой не более чем в $0,1$, что также подтверждает ее адекватность.

Таблица 3.8 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость стафилококков при температуре окружающей среды 24 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R= 0,99$ $R^2= 0,98$; $F(5,10) = 142,9$ $p<0,000001$;						
	$Beta$ - коэффициен т	Стандартная ошибка для $Beta$ - коэффициент а	B - коэффициен т	Стандартная ошибка для B - коэффициент а	Критерий Стьюдент а $t(3)$	p – уровень вероятност и
Ша г			2597,11	1777,525	20,6915	0,000000
x_1	-0,74103	0,171515	-22,7	5,243	-4,3205	0,001512
x_2	-2,32452	0,218852	-28425,4	2676,228	-10,6214	0,000001
x_1x_2	0,43471	0,107997	8,2	2,032	4,0252	0,002418
x_1^2	0,02068	0,150053	0,00087	0,006	0,1378	0,893125
x_2^2	1,23386	0,210984	5941,0	1015,882	5,8481	0,000162

3.4 Исследование влияния озонвоздушной смеси на выживаемость колиформов, находящихся в жидкой фракции навозных стоков

Стафилококки являются не единственными патогенами в навозных стоках. В жидкой фракции продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных содержатся колиформы.

Колиформы относятся к бактериям группы кишечных палочек (БГКП), их условно выделяют по морфологическим и культуральным признакам к группе семейства энтеробактерий, используемых санитарной микробиологией в качестве маркеров фекальной контаминации.

Определение влияния озона на колиформы осуществлялось по такой же методике, как и для стафилококков. Навозные стоки обрабатывались четырьмя уровнями концентрации озона в подаваемой озонвоздушной среде (50 мг/м³, 250 мг/м³, 450 мг/м³, 650 мг/м³) при четырех уровнях экспозиции (0,5 ч, 1 ч, 1,5 ч, 2 ч) и четырех уровнях температуры окружающей среды (12 °С, 16 °С, 20 °С, 24 °С).

Результаты экспериментального исследования, при котором определялось влияние озона на колиформы с заданными уровнями концентрации и экспозиции, и постоянном уровне температуры окружающей среды представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (колиформы) при температуре 12 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Среднее значение микроорганизмов тыс. кл./гр (y _{2п})
1	50	0,5	23550	23520	23600	23570	23560
2	50	1	12400	12420	12450	12390	12415
3	50	1,5	7600	7620	7580	7610	7602
4	50	2	4150	4130	4160	4140	4145
5	250	0,5	20900	20850	20800	20950	20875
6	250	1	9550	9570	9560	9540	9555
7	250	1,5	5800	5820	5780	5790	5797
8	250	2	1700	1710	1720	1690	1705
9	450	0,5	16950	16900	16800	16850	16875
10	450	1	7750	7780	7740	7760	7757
11	450	1,5	3800	3840	3810	3790	3810
12	450	2	0	0	0	0	0
13	650	0,5	11400	11450	11350	11500	11425
14	650	1	5750	5700	5650	5600	5675
15	650	1,5	1900	1950	1920	1890	1915
16	650	2	0	0	0	0	0
контроль			38000				

Результаты экспериментального исследования, представленные в таблице 3.9, указывают на угнетение колиформ при взаимодействии с озоновоздушной смесью на всех уровнях концентраций. Но необходимо отметить, что нулевой уровень содержания колиформ в обработанной среде зафиксирован только при двухчасовом воздействии на двух уровнях концентрации – 450 и 650 мг/м³. Это говорит о более высокой сопротивляемости колиформ озоновоздушному воздействию, видимо из-за ферментативных свойств и антигенной структуры. Более детально рассмотреть процесс угнетения колиформ при воздействии озона можно с помощью графической зависимости (рисунок 3.24), построенной, на основании данных, представленных в таблице 3.9.

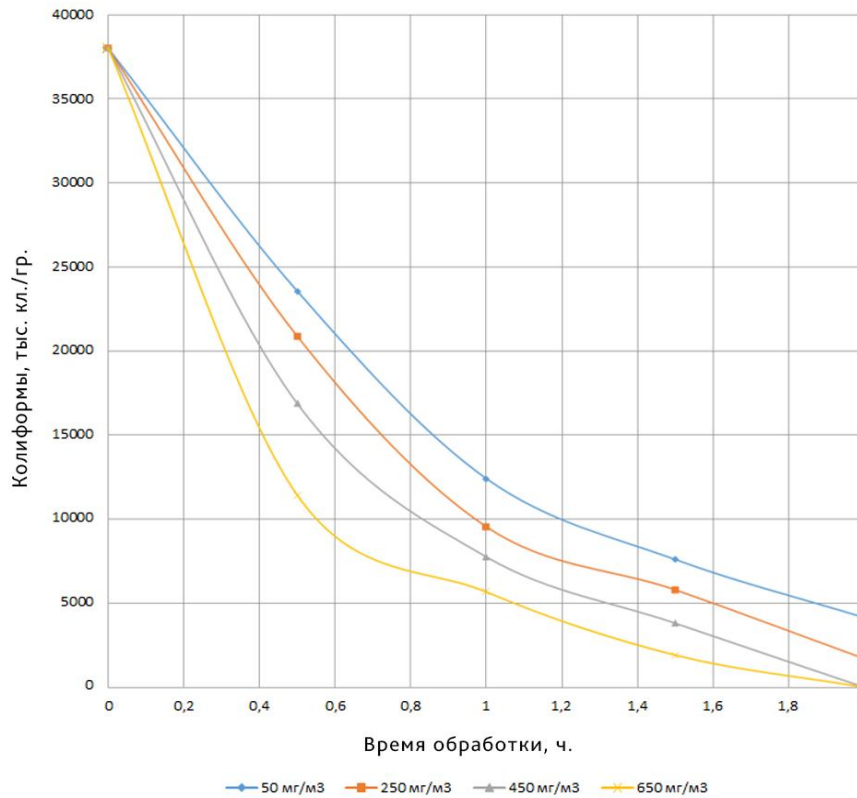


Рисунок 3.24 - График зависимости выживаемости колиформ от времени обработки озонородной смесью с заданной концентрацией озона при температуре 12 °С

Наиболее интенсивное угнетение колиформ наблюдается в первые 30–40 минут воздействия на всех уровнях концентрации озона. При данном уровне экспозиции наблюдается снижение санитарно-показательных бактерий не менее чем на 37 %. Данный результат был достигнут при минимально используемой концентрации озона 50 мг/м³, дальнейшее увеличение концентрации при тридцатиминутном воздействии позволяет снизить содержание колиформ на 45 % при уровне концентрации 250 мг/м³, 55 % при 450 мг/м³ и 70 % при 650 мг/м³.

Регрессионный анализ данных, представленных в таблице 3.9 позволил получить регрессионную модель влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость колиформов при температуре окружающей среды 12 °С. Регрессионная модель представлена в виде неравенства (3.11), а результаты регрессионного анализа представлены в виде таблицы 3.10.

$$y_2 = 37198,575 - 22,5732 \cdot x_1 - 28748 \cdot x_2 + 0,0006 \cdot x_1^2 + 8,176 \cdot x_1 \cdot x_2 + 6016 \cdot x_2^2. \quad (3.11)$$

Таблица 3.10 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость колиформ при температуре окружающей среды 12 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R= 0,99$ $R^2= 0,97$; $F(5,10) = 139,92$ $p < 0,000001$;						
	$Beta$ - коэффициент	Стандартная ошибка для $Beta$ - коэффициента	B - коэффициент	Стандартная ошибка для B - коэффициента	Критерий Стьюдента $t(3)$	p – уровень вероятности
Шаг			37198,6	1818,179	20,4592	0,000000
x_1	-0,72941	0,173306	-22,6	5,363	-4,2088	0,001803
x_2	-2,32233	0,221137	-28748,0	2737,437	-10,5018	0,000001
x_1x_2	0,42931	0,109125	8,2	2,078	3,9341	0,002801
x_1^2	0,01342	0,151620	0,0005750	0,006	0,0885	0,931198
x_2^2	1,23426	0,213187	6016,0	1039,117	5,7895	0,000175

Полученные данные свидетельствуют о достаточной взаимосвязи ($R = 0,99$) между снижением количества колиформов, а расчет критерия Фишера подтвердил адекватность построенной модели.

Результат математического моделирования влияния озоновооздушной смеси на содержание колиформ в жидкой фракции навозных стоков представлен в виде поверхности (рисунок 3.25), а также в виде графической зависимости влияния параметров озонирования на проекцию поля их выживаемости (рисунок 3.26).

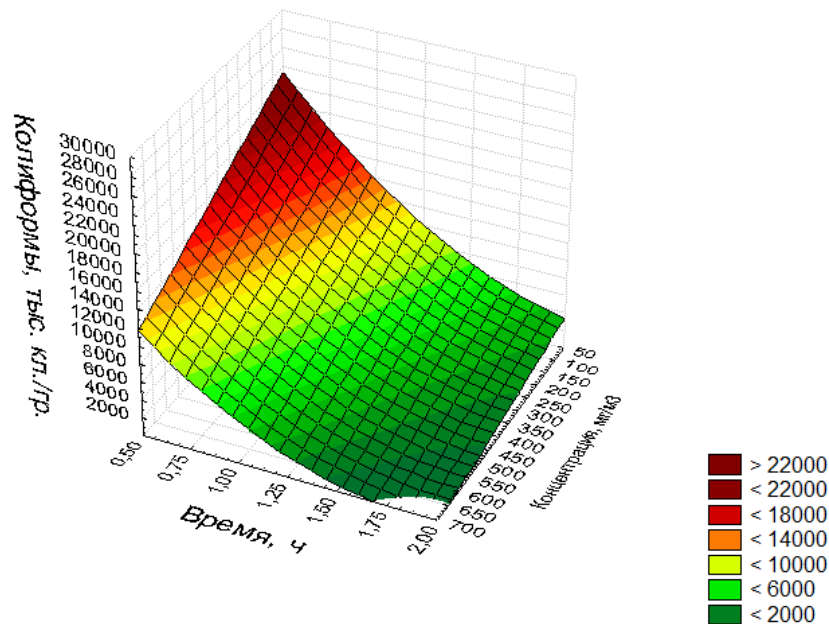


Рисунок 3.25 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на выживаемость колиформов (y_2) при температуре 12 °С

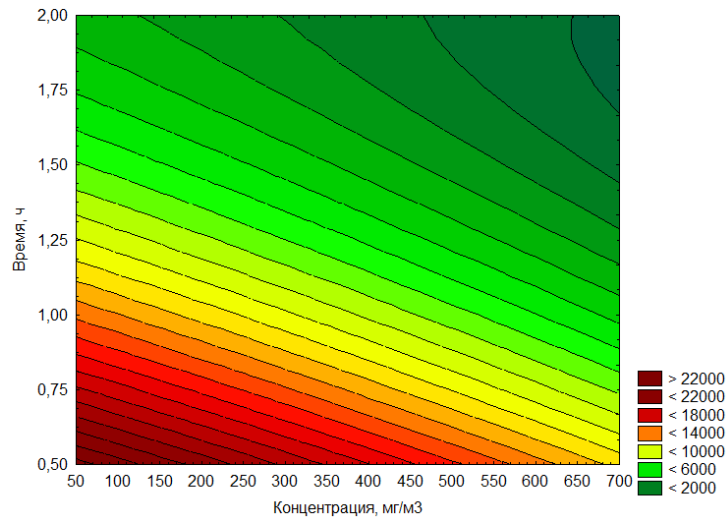


Рисунок 3.26 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на проекцию поля выживаемости колиформ (y_2) при температуре окружающей среды 12 °С

Далее в экспериментальном исследовании определяли уровень выживаемости колиформ в жидкой фракции навозных стоков при различных комбинациях озонвоздушной обработки и постоянной температуре окружающей среды 16 °С. Данные, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (колиформы) при температуре 16 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x_1)	Время обработки, ч (x_2)	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Среднее значение колиформ тыс. кл./гр (y_{2n})
1	50	0,5	23400	23450	23430	23390	23417
2	50	1	12250	12280	12240	12270	12260
3	50	1,5	7550	7560	7540	7570	7555
4	50	2	4100	4110	4090	4080	4095
5	250	0,5	20670	20650	20600	20640	20640
6	250	1	9500	9520	9480	9490	9497
7	250	1,5	5750	5740	5770	5730	5747
8	250	2	1680	1670	1680	1660	1672
9	450	0,5	16700	16650	16750	16800	16725
10	450	1	7650	7620	7670	7680	7655
11	450	1,5	3750	3770	3780	3730	3757
12	450	2	0	0	0	0	0
13	650	0,5	11300	11350	11250	11330	11307
14	650	1	5700	5750	5720	5680	5712
15	650	1,5	1840	1850	1830	1860	1845
16	650	2	0	0	0	0	0
контроль			38000				

Анализ данных, приведенных в таблице 3.11, показывает интенсификацию уничтожения колиформ в навозных стоках при увеличении температуры окружающей среды. На наш взгляд этот фактор связан с увеличением подвижности взаимодействующих молекул в камере озоноздушной обработки. Но необходимо отметить, что интенсификация процесса угнетения колиформ при увеличении температуры окружающей среды не достаточна и не позволяет достичь нулевого уровня содержания вредоносных микроорганизмов на более низких уровнях концентраций и экспозиций. Сравнив данные таблицы 3.9 и таблицы 3.11 можно сказать, что интенсивность уничтожения колиформ при заданном росте температуры с 12 °С до 16 °С, в среднем увеличилась на 1 %, наибольшая разница показателей наблюдается при обработке концентрацией озона 650 мг/м³ и экспозиции 1,5 ч и составляет 3,6 %.

Для определения математической взаимосвязи между независимыми и зависимыми переменными нами проведен регрессионный анализ данных таблицы 3.11, результаты которого сведены в таблицу 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость колиформ при температуре окружающей среды 16 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R= 0,99$ $R^2= 0,98$; $F(5,10) = 140,1931$ $p<0,000001$;						
	$Beta$ - коэффициент t	Стандартная ошибка для $Beta$ - коэффициент a	B - коэффициент t	Стандартная ошибка для B - коэффициент a	Критерий Стьюдент a $t(3)$	p – уровень вероятност и
Ша Г			37198,6	1801,636	20,4793	0,000000
x_1	-0,73462	0,173138	-22,5	5,315	-4,2430	0,001708
x_2	-2,32077	0,220923	-28494,8	2712,530	-10,5049	0,000001
x_1x_2	0,43003	0,109019	8,1	2,059	3,9445	0,002755
x_1^2	0,01832	0,151473	0,00078	0,006	0,1209	0,906155
x_2^2	1,23218	0,212981	5957,0	1029,662	5,7854	0,000176

Результатом регрессионного анализа является математическая модель, позволяющая смоделировать влияние таких факторов, как концентрация

озоновоздушной смеси и экспозиции на выживаемость колиформ при постоянной температуре окружающей среды 16 °С. Данная модель имеет вид:

$$y_2 = 36896,2016 - 22,5494 \cdot x_1 - 28494,85 \cdot x_2 + 0,0008 \cdot x_1^2 + 8,123 \cdot x_1 \cdot x_2 + 5957 \cdot x_2^2. \quad (3.12)$$

Уравнение описывает влияние параметров озонирования на выживаемость колиформов в навозных стоках при температуре 16 °С. Коэффициент детерминации выше 85 % указывает на высокое качество модели. Критерий Фишера подтвердил ее адекватность – расчетное значение (140,19) значительно превышает табличное (5,10). Проверка по критерию Стьюдента показала точность модели: ошибка не превышает 0,1. Таким образом, модель является надежной и применима для прогноза.

Следующим шагом экспериментально определили уровень выживаемости колиформ в жидкой фракции навозных стоков при различных комбинациях озоновоздушной обработки и постоянной температуре окружающей среды 20 °С. Данные, полученные в ходе эксперимента, сведем в таблицу 3.13.

Таблица 3.13 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (колиформы) при температуре 20 °С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Сред. знач. микроорганизмов тыс. кл./гр (y _{2n})
1	50	0,5	23300	23340	23320	23350	23417
2	50	1,0	12200	12220	12210	12180	12202
3	50	1,5	7500	7520	7480	7510	7502
4	50	2,0	4050	4030	4060	4040	4045
5	250	0,5	20550	20500	20580	20540	20542
6	250	1,0	9450	9460	9430	9440	9445
7	250	1,5	5700	5680	5710	5670	5690
8	250	2,0	1650	1640	1660	1640	1647
9	450	0,5	16600	16620	16580	16570	16592
10	450	1,0	7600	7630	7610	7590	7607
11	450	1,5	3700	3710	3680	3690	3695
12	450	2,0	0	0	0	0	0
13	650	0,5	11250	11240	11220	11200	11227
14	650	1,0	5670	5650	5680	5660	5665
15	650	1,5	1800	1790	1820	1830	1810
16	650	2,0	0	0	0	0	0
контроль			38000				

Анализ представленных данных (таблица 3.13) показал увеличение эффективности уничтожения колиформ в навозных стоках при увеличении температуры окружающей среды до 20°C. Но необходимо отметить, что увеличение температуры до 20°C в период озонозвоздушной обработки не позволяет достичь нулевого уровня содержания вредоносных микроорганизмов при заданных уровнях концентраций и экспозиций. Сравнив данные таблицы 3.9 и таблицы 3.13 можно сказать, что интенсивность уничтожения колиформ при заданном росте температуры с 12 °C до 20 °C, в среднем увеличилась на 1 %, наибольшая разница показателей наблюдается при обработке концентрацией озона 650 мг/м³ и экспозиции 1,5 ч и составляет 3,6 %.

Регрессионный анализ данных, представленных в таблице 3.13, позволил получить регрессионную модель влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость колиформов при температуре окружающей среды 20 °C. Регрессионная модель представлена в виде неравенства (3.13), а результаты регрессионного анализа представлены в виде таблицы 3.14.

$$y_2 = 36779.675 - 22.6542 \cdot x_1 - 28425.37 \cdot x_2 + 0.0009 \cdot x_1^2 + 8.1782x_1 \cdot x_2 + 5941 \cdot x_2^2. \quad (3.13)$$

Таблица 3.14 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость колиформ при температуре окружающей среды 20°C

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R=0,99$ $R^2=0,98$; $F(5,10) = 144,8970$ $p<0,000001$;						
	<i>Beta</i> - коэффициент	Стандартная ошибка для <i>Beta</i> - коэффициента	<i>B</i> - коэффициент	Стандартная ошибка для <i>B</i> - коэффициента	Критерий Стьюдента t (3)	p – уровень вероятности
Шаг			36779,7	1777,525	20,6915	0,000000
x_1	-0,74103	0,171515	-22,7	5,243	-4,3205	0,001512
x_2	-2,32452	0,218852	-28425,4	2676,228	-10,6214	0,000001
x_1x_2	0,43471	0,107997	8,2	2,032	4,0252	0,002418
x_1^2	0,02068	0,150053	0,00087	0,006	0,1378	0,893125
x_2^2	1,23386	0,210984	5941,0	1015,882	5,8481	0,000162

На основании расчета регрессионной модели могут быть получены диаграммы влияния параметров озонозвоздушной обработки на выживаемость

колиформ при постоянной температуре окружающей среды 20°C (рисунок 3.27, 3.28).

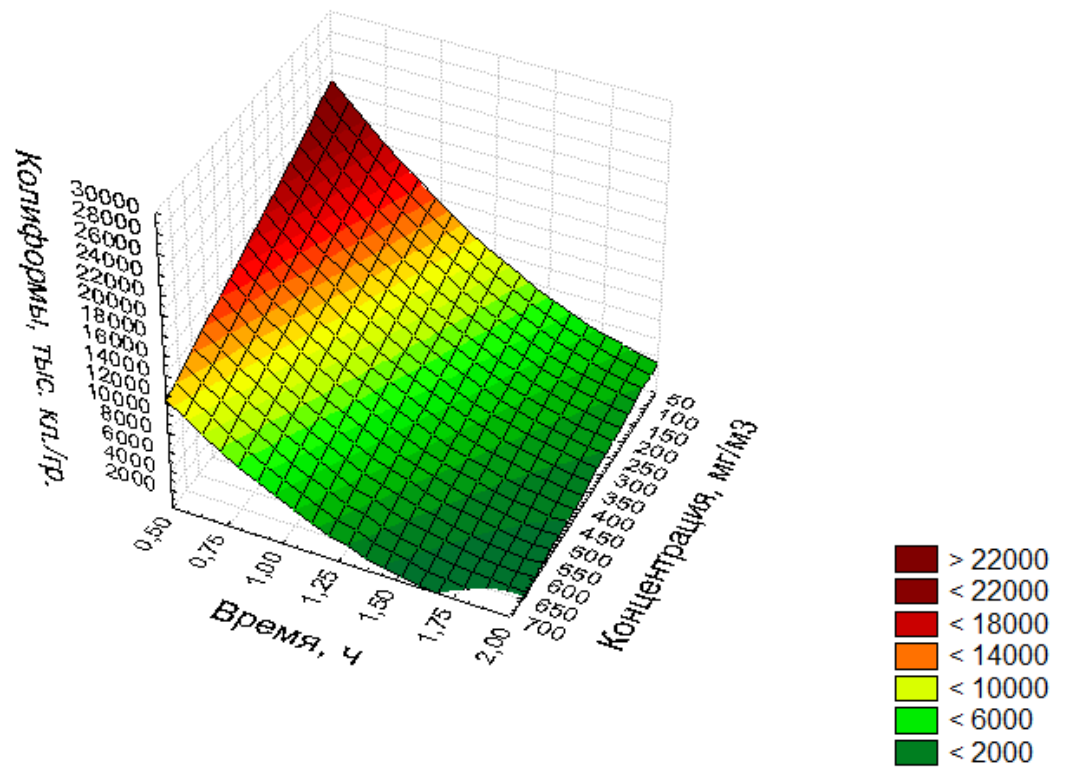


Рисунок 3.27 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на выживаемость колиформов (y_2) при температуре 20 °С

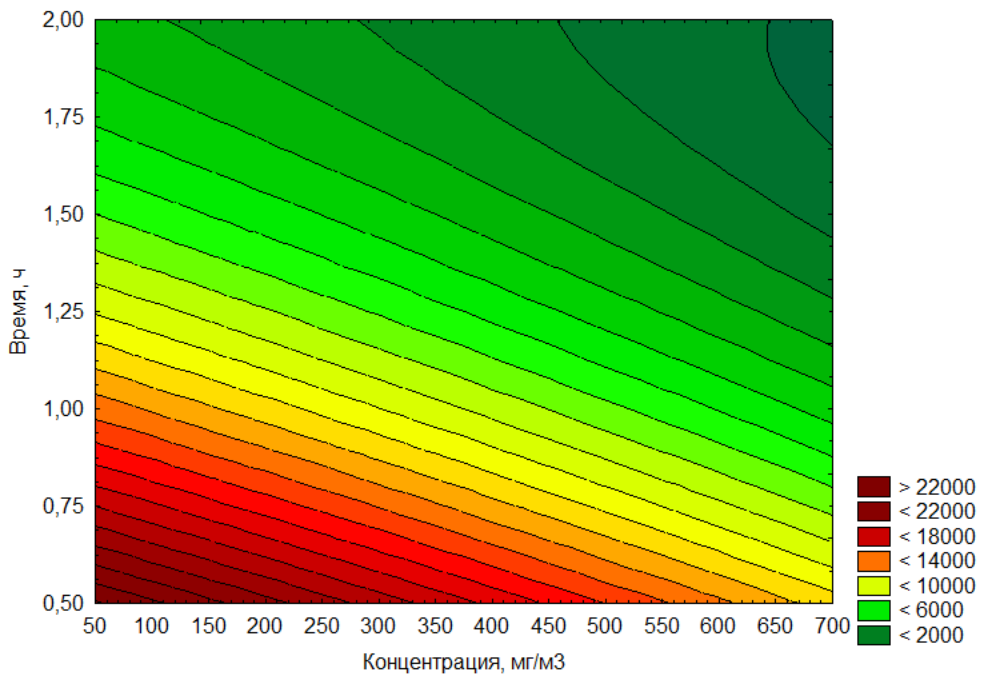


Рисунок 3.28 – Диаграмма влияния времени обработки (x_1) и концентрации озона (x_2) на проекцию поля выживаемости колиформов (y_2) при температуре окружающей среды 20 °С

Также нами проведено экспериментальное исследование, в котором определяли уровень выживаемости колиформ в жидкой фракции навозных стоков при различных комбинациях воздействия озона и постоянной температуре окружающей среды 24 °С. Данные, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (колиформы) при температуре 24°С

№ опыта	Концентрация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обработки, ч (x ₂)	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Колиформы, тыс. кл./гр.	Среднее значение микроорганизмов тыс. кл./гр (y _{2п})	
1	50	0,5	23250	23200	23280	23220	23237	
2	50	1	12100	12150	12120	12140	12127	
3	50	1,5	7450	7470	7430	7440	7447	
4	50	2	4020	4010	4000	4030	4020	
5	250	0,5	20400	20350	20380	20420	20387	
6	250	1	9400	9370	9390	9410	9392	
7	250	1,5	5650	5660	5630	5640	5645	
8	250	2	1620	1610	1630	1630	1625	
9	450	0,5	16500	16450	16400	16530	16470	
10	450	1	7550	7570	7540	7530	7547	
11	450	1,5	3670	3650	3660	3640	3655	
12	450	2	0	0	0	0	0	
13	650	0,5	11150	11100	11080	11120	11112	
14	650	1	5630	5600	5610	5640	5620	
15	650	1,5	1780	1750	1770	1740	1760	
16	650	2	0	0	0	0	0	
контроль							38000	

Данные представленные в таблице 3.15 подтверждают эффективность исследования озоноздушной смеси при уничтожении колиформ в жидкой фракции навозных стоков. Как и в предыдущих случаях нулевого уровня содержание колиформ удастся достичь при двухчасовой обработке в камере озоноздушной обработки при уровнях концентрации озона 450 и 650 мг/м³.

Регрессионный анализ данных, представленных в таблице 3.16 позволил получить регрессионную модель влияния параметров озонирования жидких

навозных стоков на выживаемость колиформов при температуре окружающей среды 24 °С. Регрессионная модель представлена в виде неравенства (3.14), а результаты регрессионного анализа представлены в виде таблицы 3.16.

$$y_2 = 36616,1328 - 22,7247 \cdot x_1 - 28304,11 \cdot x_2 + 0,0009 \cdot x_1^2 + 8,2136 \cdot x_1 \cdot x_2 + 5914,5 \cdot x_2^2. \quad (3.14)$$

Таблица 3.16 – Результаты регрессионного анализа влияния параметров озонирования жидких навозных стоков на выживаемость колиформ при температуре окружающей среды 24 °С

Суммарная регрессия для зависимой переменной y : $R= 0,99$ $R^2= 0,98$; $F(5,10) = 144,0289$ $p<0,000001$;						
	<i>Beta</i> - коэффициент	Стандартная ошибка для <i>Beta</i> - коэффициента	<i>B</i> - коэффициент	Стандартная ошибка для <i>B</i> - коэффициента	Критерий Стьюдента t (3)	p – уровень вероятности
Шаг			36616,1	1761,215	20,7903	0,000000
x_1	-0.74371	0,170849	-22,7	5,195	-4,3741	0,001390
x_2	-2,32697	0,218002	-28304,1	2651,672	-10,6741	0,000001
x_1x_2	0,43892	0,107578	8,2	2,013	4,0800	0,002214
x_1^2	0,02235	0,149471	0,0	0,006	0,1495	0,884117
x_2^2	1,23492	0,210165	5941,5	1006,561	5,8759	0,000156

Полученные данные свидетельствуют о достаточной взаимосвязи ($R = 0,99$) между снижением количества, а расчет критерия Фишера подтвердил адекватность построенной модели.

Таким образом нами найдены регрессионные модели для всех исследуемых уровней озонозвоздушной обработки, расчет которых позволяет оценить эффективность использования озона для уничтожения патогенной микрофлоры в жидкой фракции навозных стоков.

Также установлено, что уровень температуры окружающей среды не оказывает значительного влияния на снижение уровня колиформ, так как при всех уровнях температуры нулевое содержание колиформ удавалось достичь при одних и тех же уровнях концентрации и экспозиции. Выживаемость колиформ при воздействии озонозвоздушной смеси с концентрацией 450 и 650 мг/м³ и экспозиции в 1,5 и 2 часа при различных температурах приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Экспериментальные данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии (колиформы) при температуре от 12 до 24 °С

№ опы та	Темпера тура	Концентр ация озона, мг/м ³ . (x ₁)	Время обрабо тки, ч (x ₂)	Колифо рмы, тыс. кл./гр.	Колифо рмы, тыс. кл./гр.	Колифо рмы, тыс. кл./гр.	Колифо рмы, тыс. кл./гр.	Среднее значение микроорган измов тыс. кл./гр (y _{2n})
1	12	450	1,5	3800	3840	3810	3790	3810
2	12	450	2	0	0	0	0	0
3	12	650	1,5	1900	1950	1920	1890	1915
4	12	650	2	0	0	0	0	0
5	16	450	1,5	3750	3770	3780	3730	3757
6	16	450	2	0	0	0	0	0
7	16	650	1,5	1840	1850	1830	1860	1845
8	16	650	2	0	0	0	0	0
9	20	450	1,5	3700	3710	3680	3690	3695
10	20	450	2,0	0	0	0	0	0
11	20	650	1,5	1800	1790	1820	1830	1810
12	20	650	2,0	0	0	0	0	0
13	24	450	1,5	3670	3650	3660	3640	3655
14	24	450	2	0	0	0	0	0
15	24	650	1,5	1780	1750	1770	1740	1760
16	24	650	2	0	0	0	0	0

Выбор режимных параметров электроозонной обработки жидкой фракции навозных стоков осуществлялся по выживаемости колиформ, так как проведенные исследования показали, что выживаемость стафилококков при тех же режимах обработки значительно ниже (таблицы 3.1, 3.3, 3.5, 3.7).

3.5 Выводы

1. На основании данных, полученных в ходе экспериментального исследования определено наиболее рациональное сочетание конструкционных параметров газоразрядного блока (материал диэлектрических барьеров – стекло; ширина воздушного зазора – 1–2 мм; ширина диэлектрических пластин – 2 мм), позволяющее получить максимальное значение коэффициента мощности генератора озона равного 0,5 при питающем напряжении 8–8,5 кВ.

2. Полученные результаты исследования позволяют определить режимные параметры электроозонирования жидкой фракции навозных стоков животноводческих предприятий, с целью уничтожения стафилококков и колиформ. Полное обеззараживание жидкой фракции навозных стоков достигается при времени экспозиции 2 часа в камере обработки с концентрацией озона 450 мг/м³.

4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ

4.1 Разработка системы автоматизации установки для комплексной очистки навозных стоков

Разработанная технология комплексной очистки навозных стоков животноводческих комплексов объединяет четыре отдельных процесса, каждый из которых выполняет определенную функцию. Контроль параметров при протекании каждой технологической фазы является неотъемлемой частью, обеспечивающей качество выполняемых операций. Таким образом, для обеспечения эффективности и безопасности протекания процесса очистки навозных стоков животноводческих комплексов с минимальным участием человека необходимо разработать систему автоматического управления технологического процесса. Начинать проектирование системы автоматизации следует с разработки алгоритма ее работы. Составление алгоритма сопряжено с рядом условий, выполнение которых необходимо для успешной реализации проекта.

Учитывая вышесказанное, установим последовательность составления алгоритма работы системы автоматизации:

1. Определим места расположения датчиков и типы информационных сигналов, поступающих с них.
2. Выберем устройства, принимающие управляющее воздействие.
3. Сформируем комбинации входных сигналов системы управления.
4. Установим режимы работы оборудования, воспринимающего управляющие сигналы.
5. Зададим длительность и цикличность выполняемых действий.
6. Учитывая принципы направленности действия (каждый последующий элемент схемы не должен воздействовать на предыдущий), определим последовательность включения и отключения оборудования технологической

линии. Также алгоритм САУ должен учитывать все возможные решения, которые должны быть заложены в ПЛК.

Опираясь на вышеизложенные условия и требования, нами разработан алгоритм работы САУ технологического процесса очистки навозных стоков, который представлен в виде блок-схемы на рисунке 4.1.

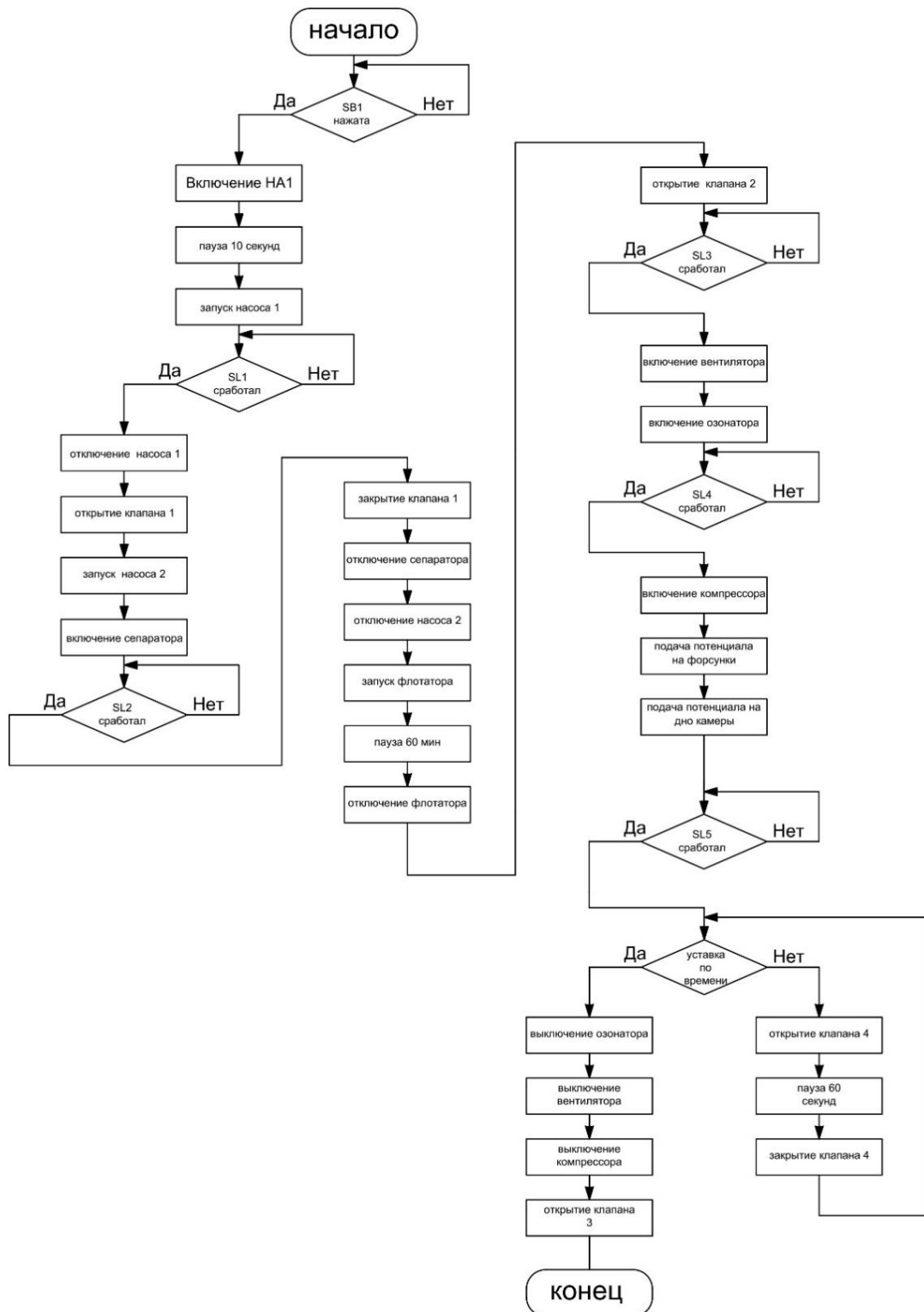


Рисунок 4.1 – Алгоритм работы САУ станции очистки навозных стоков

Алгоритм предусматривает запуск процесса очистки после нажатия оператором кнопки SB1 «Пуск». Процесс завершается только после того, как заданный объем навозных стоков пройдет все этапы очистки. После окончания, заложенного в программу цикла, система управления переводит станцию в исходное состояние, цикл очистки повторяется.

На основании представленной блок-схемы последовательности функционирования системы автоматического управления станции очистки навозных стоков (рисунок 4.1) разработаем функциональную схему, которая позволит визуализировать места установки узлов, формирующих сигналы и устройств, принимающих управляющее воздействие.

Внешний вид разработанной функциональной схемы представлен на рисунке 4.2.

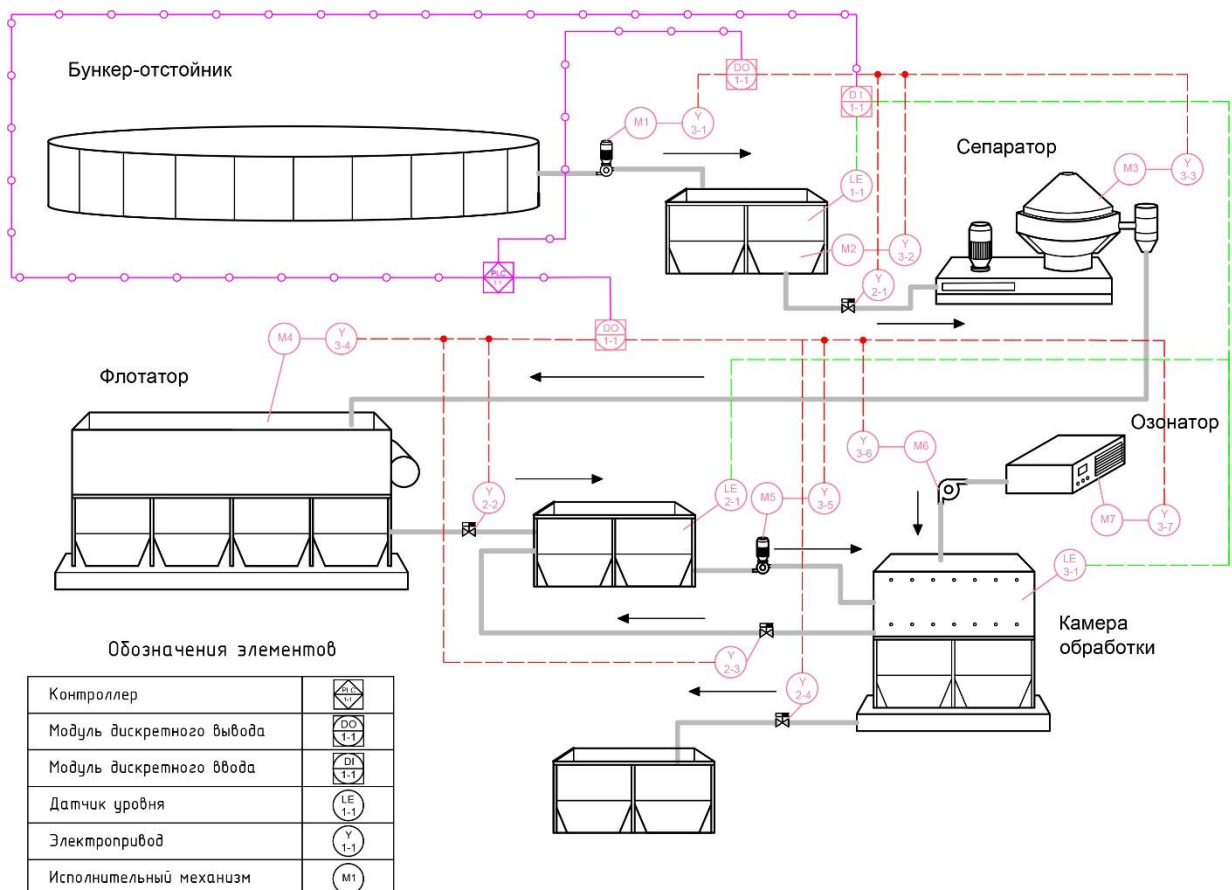


Рисунок 4.2 – Функциональная схема системы автоматизации станции очистки навозных стоков

Управление станцией очистки стоков осуществляется при помощи программируемого логического контроллера (например, BERGHOF-EC1000), который установлен в щите автоматического управления технологическим процессом. Запуск системы автоматизации обеззараживания навозных стоков осуществляется при нажатии кнопки SB1 «Пуск». Контроллер диагностирует оборудование и запускает исполнительные механизмы, в соответствии с записанной в него программой. Связь с программируемым логическим контроллером и датчиками осуществляется через протокол RS-485. На основании сигналов, полученных от датчиков, контроллер формирует управляющее воздействие на клапаны и включает, либо отключает исполнительные механизмы.

Основной задачей системы автоматизированного управления является контроль последовательности протекания технологического процесса, разбитого на несколько этапов. Для контроля заполнения бункеров и промежуточных емкостей установлены датчики уровней LE1-LE3.

Датчики уровней в емкостях установлены для того, чтоб оператор по мнемосхеме мог отследить перемещение стоков и понимать какие этапы очистки стоков находятся в работе.

Для наглядности процесса на щите автоматизации установлены сигнальные лампы, которые информируют о том, какой механизм в данный момент запущен. Также полная информация о состоянии технологического процесса отображается на компьютере или панели оператора.

Так как разработанная схема автоматизации оснащена большим количеством датчиков и исполнительных механизмов, то для ее практической реализации необходимо использовать модули ввода и вывода сигналов. В представленной системе использованы модули расширения дискретных и аналоговых сигналов фирмы BERGHOF. Обмен данными между модулями и ПЛК осуществляется через внутреннюю шину EtherCAT.

Последовательность выполняемых действий подробно описана в 3 главе данной работы. Реализация схемы управления возможна с помощью устройств и аппаратов различных отечественных компаний, таких как «Овен», «ИЕК»,

«Новатек-Электро» и др. Оборудование, производимое данными компаниями, позволяет в полной мере осуществить контроль и управление разработанной станцией комплексной очистки навозных стоков животноводческих комплексов. Таким образом, разработка щита системы управления может быть выполнена инженерными подразделениями сельхозтоваропроизводителей, использующих предлагаемое нами оборудование, с учетом собственных предпочтений в части формирования автоматизированных систем.

4.2 Технико-экономическое обоснование применения комплексной технологии очистки навозных стоков

Расчет экономической эффективности применения комплексной технологии обеззараживания жидких навозных стоков необходимо проводить на основании существующих методик, положений и норм, изложенных в соответствующих нормативных документах. Также в расчетах необходимо учитывать среднегодовой уровень инфляции.

Помимо этого, необходимо учитывать, что аналогичное оборудование производится только иностранными организациями, которые в своей технологии используют химические реагенты для угнетения патогенной микрофлоры, а не озоноздушную смесь, что значительно снижает экономический эффект при внедрении подобного оборудования. Также необходимо отметить их низкий срок службы (2–3 года) и высокую стоимость, более 10 млн рублей, что в несколько раз превышает стоимость предлагаемой нами технологической линии очистки навозных стоков.

Основными критериями экономического эффекта использования озона для дезинфекции жидкой фракции навозных стоков являются – снижение уровня затрат на приобретение оборудования, в сравнении с представленными на рынке аналогами; дополнительные поступления денежных средств за счет реализации твердой фракции навоза в качестве органического удобрения; уменьшение

санитарной зоны предприятия, что в свою очередь будет способствовать расширению производственных мощностей.

Для расчета стоимости станции по обработке навозных стоков составлена спецификация, представленная в таблице 4.1. Стоимость станции складывается из цен на комплектующие (флотатор, сепаратор, озонатор, источники питания и другие), а также заработной платы работников, участвующих в сборке станции и изготовлении комплектующих, транспортных расходов и отчислений за использование авторских прав. Итоговая сметная стоимость установки вместе с монтажом составила 1 980 000 рублей, но необходимо учитывать, что, при поступлении комплектующих в серийное производство, цена на установку значительно снизится, что в свою очередь позволит уменьшить затраты на ее приобретение.

Для оценки экономической эффективности установки по очистке навозных стоков рассчитывается чистый дисконтированный доход (ЧДД) – сумма приведенных к начальному периоду чистых денежных потоков за весь срок эксплуатации. Он показывает, насколько общие результаты превышают затраты с учетом временной стоимости денег. Расчет ЧДД выполняется по стандартной методике:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^T (P_t - I_{\text{эт}}) \cdot \frac{1}{(1 + E_p)^t} - K_d; \quad (4.1)$$

$$\text{ЧДД} = -K_d + (P_t - I_{\text{эт}}) \cdot K_{\text{сд}}, \quad (4.2)$$

где P_t – результаты, достигаемые при шаге расчета t , руб.;

T – горизонт расчета, лет;

K_d – сумма дисконтированных капиталовложений, руб.;

$K_{\text{сд}}$ – коэффициент суммы дисконтирования, рассчитываемый по формуле:

$$K_{\text{сд}} = \sum_{i=1}^T (P_t - I_{\text{эт}}), \quad (4.3)$$

где E_p – норма дисконта капитала с поправкой на инфляцию, является реальной процентной ставкой, которая учитывает инфляцию:

$$E_p = \frac{1 + E}{1 + r} - 1, \quad (4.4)$$

где r – уровень инфляции, %;

E – ставка процента банка, %.

Сумма дисконтированных капиталовложений рассчитывается по формуле:

$$K_d = \sum_{i=1}^T K_t \cdot \frac{1}{(1 + E_p)^t}, \quad (4.5)$$

где K_t – капиталовложения на шаге расчета t , руб.

Для оценки коммерческой эффективности используется показатель потока реальных денег (Cash Flow). Поток реальных денег на каждом шаге (Φ_t) определяется как разница между притоком (Π_t) и оттоком (O_t) денежных средств.

Капитальные вложения на единицу работы (руб./шт.) рассчитываются для одной установки, выполняющей годовой объем работ, по соответствующей формуле:

$$K_d = \frac{M \cdot n + П \cdot n + ТЗ + С + ОП + ОХ}{W_{год}}, \quad (4.6)$$

где M – затраты на материалы, руб.;

$П$ – затраты на покупные изделия, руб.;

$ТЗ$ – транспортно-заготовительные расходы, руб.;

$С$ – затраты на оплату труда при изготовлении установки, руб.;

$ОП$ – общепроизводственные расходы, руб.;

$ОХ$ – общехозяйственные расходы, руб.;

n – количество установок, шт.

Транспортно-заготовительные расходы определяются в процентах от удельной стоимости покупных материалов и изделий:

$$ТЗ = \frac{(M \cdot n + П \cdot n) \cdot \mu_{тр}}{100}, \quad (4.7)$$

Здесь $\mu_{тр}$ – доля транспортно-заготовительных расходов, составляющая по данным предприятия 20 %. Согласно общепринятой методике, рассчитаны затраты на оплату труда при изготовлении установки для очистки навозных стоков. В

качестве примера взята установка производительностью 4 м³/ч. Расчет выполнен по формуле [39]:

$$C_3 = OT_{\text{тар}} \cdot \alpha_n \cdot \alpha_{\text{доп}} \cdot \alpha_{\text{отч}}, \quad (4.8)$$

где $OT_{\text{тар}}$ – оплата труда по тарифной сетке, руб.;

α_n – коэффициент, учитывающий премии (принимается 1,2–1,4);

$\alpha_{\text{доп}}$ – коэффициент для учета дополнительной оплаты труда (1,12–1,16);

$\alpha_{\text{отч}}$ – коэффициент отчислений на страхование (принят 1,3).

Оплата труда по тарифу зависит от трудоемкости работ и часовой ставки, соответствующей квалификационному разряду сотрудника [91]:

$$OT_{\text{тар}} = T_{\text{ем}} \cdot \tau_{\text{час}} \cdot n, \quad (4.9)$$

где $T_{\text{ем}}$ – трудоемкость выполняемых работ необходимых для изготовления комплектующих и сборки установки, чел/ч;

$\tau_{\text{час}}$ – тарифная ставка, соответствующая разряду рабочего, руб.

Общепроизводственные и общехозяйственные расходы определяются в процентах от основной зарплаты на изготовление установки [38]:

$$OP = \frac{OT_{\text{тар}} \cdot \mu_{\text{оп}}}{100}, \quad (4.10)$$

где $\mu_{\text{оп}}$ – процент общепроизводственных расходов (принимается в соответствии с предоставленными данными предприятия 10...15 %).

$$OX = \frac{OT_{\text{тар}} \cdot \mu_{\text{ох}}}{100}, \quad (4.11)$$

где $\mu_{\text{ох}}$ – процент общехозяйственных расходов (принимается в соответствии с предоставленными данными предприятия 15...20 %).

Расчет экономической эффективности включает определение удельных дополнительных капиталовложений на единицу работы, которые рассчитываются по следующей формуле:

$$K_{\text{б.уд.}} = \frac{C_{\text{об}} \cdot K}{W_{\text{год}}}, \quad (4.12)$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость (цена) оборудования, руб.

Помимо удельных капиталовложений, в расчете экономической эффективности использования предлагаемого оборудования учитываются эксплуатационные затраты на единицу работы, которые определяются из следующей зависимости [97]:

$$И_{\text{э}} = З + А + Т_{\text{р}} + С_{\text{э}} + П_{\text{р}}, \quad (4.13)$$

где $З$ – удельный годовой фонд заработной платы обслуживающего персонала с начислениями, руб.;

$А$ – амортизационные отчисления, руб.;

$Т_{\text{р}}$ – отчисления на техническое обслуживание и ремонт, руб.;

$С_{\text{э}}$ – годовые затраты на потребленную электроэнергию, руб.;

$П_{\text{р}}$ – прочие прямые затраты, руб.

В свою очередь удельные затраты на оплату труда рассчитываются по следующему выражению:

$$З = \frac{(O \cdot t_{\text{у.е.э.}} \cdot \tau_{\text{час эл.}} + T_{\text{год}} \cdot \tau_{\text{час}}) \cdot \alpha_n \cdot \alpha_{\text{доп}} \cdot \alpha_{\text{отч}}}{W_{\text{год}}}, \quad (4.14)$$

где O – объем работ, у.е.э.;

$t_{\text{у.е.э.}}$ – трудоемкость одной условной единицы работы, чел.·ч (принимается равным 18,6 чел.·ч);

$\tau_{\text{час эл.}}$ – часовая тарифная ставка электромонтера, руб./чел.·ч;

$T_{\text{год}}$ – годовая трудоемкость эксплуатационных работ, чел.·ч;

$\tau_{\text{час}}$ – часовая тарифная ставка рабочего соответствующего разряда, руб./чел.·ч;

α_n – коэффициент премий (1,2–1,4);

$\alpha_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной оплаты труда (1,12–1,16);

$\alpha_{\text{отч}}$ – коэффициент страховых отчислений (принят 1,3).

Амортизационные отчисления на единицу работы (руб./шт.) учитывают капиталовложения в создание установки для очистки навозных стоков и рассчитываются следующим образом:

$$А = \frac{K \cdot N_A}{100 \cdot W_{\text{год}}}, \quad (4.15)$$

где K – балансовая стоимость оборудования (капиталовложения), руб.;

N_A – норма годовых амортизационных отчислений, % (принята равной 14,3 %).

Отчисления на ремонт и техническое обслуживание оборудования формируются ежегодно, учитывают виды выполняемых работ и определяются укрупнено по следующему соотношению:

$$T_p = \frac{K \cdot N_p}{100 \cdot W_{\text{год}}}, \quad (4.16)$$

где N_p – норматив годовых отчислений на ремонт и техническое обслуживание, не менее 16 %, исходя из полного покрытия стоимости установки за эксплуатационный период, установленный производителем.

Затраты на потребленную электроэнергию определяются по следующей формуле:

$$C_э = \frac{P \cdot t \cdot T_э \cdot k_з}{W_{\text{год}}}, \quad (4.17)$$

где P – мощность потребителя, кВт;

t – годовое число часов работы, ч.;

$T_э$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

$k_з$ – коэффициент загрузки установки.

Удельные прочие затраты должны составлять не менее 10 %, следовательно, их определяют укрупнено по следующей зависимости:

$$P_{\text{уд}} = 0,10 \cdot (З + A + T_p + C_э). \quad (4.18)$$

Дополнительный эффект от внедрения установки определим по формуле:

$$Д = 0,10 \cdot (ВП_{\text{оз}} - ВП_{\text{к}}) \cdot Ц, \quad (4.19)$$

где $ВП_{\text{оз}}$ – валовая продукция с новой установки, кг;

$ВП_{\text{к}}$ – валовая продукция с базисной установки, кг.

Срок окупаемости капитальных вложений рассчитывается как отношение дополнительных поступлений от использования оборудования к затратам на его создание:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{доп.уд.}}}{Д - И_э}. \quad (4.20)$$

Результаты технико-экономического обоснования представлены в таблицах 4.1, 4.2.

Таблица 4.1 – Расчет экономических показателей

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	2016	2017	2018	2019	2020	
1	Норма доходности (банковская кредитная ставка)	%	10,5	9,5	7,5	6,5	4,2	
2	Годовой уровень инфляции	%	5,4	2,5	4,3	3,0	4,9	
3	Оптовая цена навоза	руб./кг	0,40	0,42	0,42	0,44	0,45	
4	Реализация навоза при традиционной обработке	кг	2120000	2000500	1995000	2200000	2000600	
5	Реализация навоза при использовании станции очистки	кг	2920000	2840000	2790000	2940000	2890000	
6	Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии	руб.	5,9	6,5	7,2	8,7	9,5	
7	Эксплуатационные затраты при традиционной технологии	руб.	590780	612560	627900	645200	653769	
8	Эксплуатационные затраты при новой технологии	руб.	461684	476940	483072	496212	503220	
9	Валовой доход при традиционной технологии	руб.	848000	840210	837900	968000	900270	
10	Валовой доход при новой технологии	руб.	1168000	1192800	1171800	1293600	1300500	
11	Прибыль при традиционной технологии	руб.	257220	227650	210000	322800	246501	
12	Прибыль при новой технологии	руб.	696 316	715 860	688728	797388	797280	
13	Рентабельность при традиционной технологии	%	30,33	27,09	25,06	33,34	27,38	
14	Рентабельность при новой технологии	%	59,61	60,01	58,77	61,64	61,30	
15	Экономия производственных затрат при новой технологии	руб.	119096	135620	144828	148988	150549	
16	Дополнительный доход от продажи навоза	руб.	439096	488210	478728	474588	550779	
17	Окупаемость капитальных вложений за счет увеличения продаж навоза	год	5,2					

Продолжение таблицы 4.1

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	2016	2017	2018	2019	2020
18	Чистый дисконтированный доход за счет увеличения продаж навоза	руб.	417659	419860	378195	346449	374529
			1936692				

Таблица 4.2 – Расчет чистого дисконтированного дохода

Показатели	Годы					
	0	1	2	3	4	5
Приток, руб.		696316	715860	688728	797388	797280
Отток, руб.	1980000	461684	476940	483072	496212	503220
Cash Flow, руб.	-1980000	449096	488210	478728	474588	550779
α_t		0,93	0,86	0,79	0,73	0,68
(Cash Flow) · α_t , руб.		417659	419860	378195	346449	374529
ЧДД = 1936692 руб.						

Визуализировать полученные в ходе расчета данные можно в виде графической зависимости, представленной на рисунке 4.3:

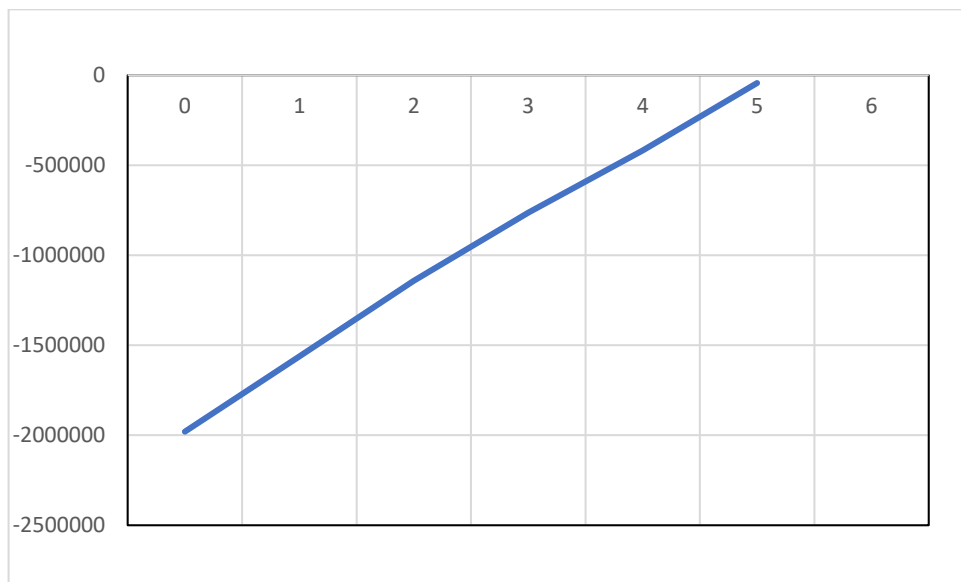


Рисунок 4.3 – Приток реальных денежных средств при использовании оборудования за пять лет

Таким образом, оценка эффективности применения станции очистки навозных стоков с использованием электроозонирования показала, что за 5 лет проект окупится на 98 %, а чистый дисконтированный доход составит 1 936 692 руб., при условии, что станция очистки навозных стоков будет использоваться в свиноводческом комплексе на 1000 голов и работать 4 часа в сутки. При внедрении станции в хозяйства с большим количеством голов свиней и увеличением загруженности до 8 часов в сутки и более, экономический эффект возрастет и срок окупаемости станции значительно сократиться за счет увеличения чистого дисконтированного дохода от продажи навоза в виде удобрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполнения исследования

1. Определено, что емкость газоразрядного блока зависит от конструкционных параметров, таких как ширина газоразрядного промежутка и диэлектрических барьеров. Установлено, что наибольшее влияние на коэффициент мощности, а, следовательно, и производительность генератора озона, оказывает барьерная емкость - величина, которой обусловлена шириной диэлектрической пластины. Изменение емкости газоразрядного промежутка в диапазоне от 1 до 2,4 нФ, приводит к увеличению активной мощности от 110 до 420 Вт, и реактивной от 301 до 885 вар, что сказывается на росте коэффициента мощности с 0,34 до 0,43 (прирост 25 %). Аналогичное изменение барьерной емкости (диапазон изменения от 1 до 2,4 нФ) приводит к более интенсивному росту значения коэффициента мощности с 0,34 до 0,68, по сравнению с изменением емкости газоразрядного промежутка.

2. Разработана математическая модель взаимодействия озоновоздушной смеси с жидкой фракцией навозных стоков, которая позволила:

– установить, что мелкодисперсное распыление жидкой фракции навозных стоков в газовую среду камеры обработки позволяет более, чем в 300 раз увеличить площадь взаимодействия сред жидкость-газ по сравнению с барботированием;

– определить, что силовые линии электрического поля напряженностью 855 В/м направлены навстречу капле радиусом 2,77 мкм с положительным зарядом 10^{-15} Кл, и способствуют увеличению времени воздействия озоновоздушной смеси на обрабатываемую среду и как следствие повышают абсорбцию озона в камере обработки до 52 %;

– выявить, что наложение электрического поля на внутреннюю среду камеры обработки позволяет замедлить осаждение капель, что в свою очередь приводит к интенсификации абсорбционных процессов озона в обрабатываемую жидкую фракцию навозных стоков.

3. Анализ экспериментальных исследований показал:

– наиболее приемлемым материалом для изготовления диэлектрических барьеров газоразрядного блока генератора озона является стекло, так как при прочих равных параметрах потребление тока данным блоком в 1,5 раза больше, чем у блока из гетинакса и в 1,2 раза больше, чем у блока из стеклотекстолита;

– исследование влияния ширины воздушного промежутка на электрические параметры генератора озона позволило установить наличие обратной взаимосвязи между шириной воздушного зазора и потребляемым током установки: 4 мм – 17 мА; 3 мм – 21 мА; 2 мм – 25 мА; 1 мм – 33 мА;

– ширина диэлектрического барьера оказывает значительное влияние на активную мощность генератора озона. Наибольшее значение активной мощности зафиксировано у газоразрядного блока с шириной барьера 2 мм и предельном уровне приложенного напряжения 10 кВ, увеличение же ширины барьера до 3 мм привело к снижению активной мощности на 9 %, а при ширине барьера 4 мм – на 32 %;

– наиболее приемлемыми конструктивными характеристиками разрядного блока при рабочих уровнях напряжения 8–8,5 кВ являются: материал диэлектрических барьеров – стекло; ширина воздушного зазора – 1–2 мм; ширина диэлектрических пластин – 2 мм. Максимальный коэффициент мощности для блока с приведенными параметрами составил 0,5.

4. Экспериментальные исследования подтвердили, что озоновоздушная смесь эффективно уничтожает патогенную микрофлору, содержащуюся в жидкой фракции навозных стоков. При этом дезинфицирующий эффект достигается при концентрации озона не менее 450 мг/м^3 и времени взаимодействия жидкой фракции с озоновоздушной смесью не менее 2 ч. Этот режим обработки позволяет снизить уровни содержания стафилококков и колиформ до нуля. В то же время концентрация озона от 450 до 650 мг/м^3 не приводит к снижению времени обработки, следовательно, использование более мощных генераторов озона, на наш взгляд, не целесообразно. Рассмотренная технология прошла производственные испытания на базе свиноводческого комплекса ООО «Новые

аграрные технологии» и доказала свою эффективность. Представленная технология защищена патентом РФ №RU2688610C1 «Способ очистки навозных стоков».

5. Выполнено технико-экономическое обоснование применения электроозонирования для обеззараживания навозных стоков животноводческих комплексов. При использовании станции обеззараживания жидкой фракции навозных стоков в свиноводческом комплексе на 1000 голов, срок окупаемости вложений составит 5,2 года. Экономический эффект достигается за счет увеличения объемов продаж переработанного навоза (органические удобрения) и определяется через чистый дисконтированный доход, который составил 1936692 руб.

Рекомендации и предложения производству

Рекомендуется внедрение разработанной установки для электроозонирования навозных стоков на свиноводческих комплексах как энергоэффективного и экологически безопасного способа их обеззараживания. Предложенная технология позволяет снизить микробную нагрузку в стоках на 99 % и более, уменьшить неприятные запахи, а также повысить качество органического удобрения, получаемого после переработки. Внедрение установки целесообразно осуществлять на этапе доочистки сточных вод перед их использованием в сельскохозяйственном производстве, что соответствует современным требованиям охраны окружающей среды и рационального использования ресурсов в агропромышленном комплексе.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с оптимизацией конструкционных и энергетических параметров электроозонатора, а также с расширением его функциональных возможностей – в частности, интегрирования в систему утилизации биогаза и рекуперации тепла. Помимо этого, представляется целесообразным проведение комплексных исследований по изучению влияния обработанных стоков на агрохимические свойства почв и урожайность сельскохозяйственных культур, а также разработка модульных решений, адаптированных под различные типы и масштабы животноводческих предприятий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОМЧ – общее микробное число, м. к./м³.

$C_{p.б.}$ – суммарная емкость разрядного блока генератора озона, Ф.

$C_{б1}$ и $C_{б2}$ – емкость диэлектрических барьеров разрядного промежутка, Ф.

$C_{г}$ – емкость газоразрядного промежутка, Ф.

$U_{дуг.p.}$ – уровень напряжения, при котором возникает дуговой разряд, кВ.

$I_{з.p.}$ – ток зажигания разряда, мА.

$U_{з.p.}$ – напряжение зажигания разряда, кВ.

$U_{г}$ – падение напряжения на газоразрядном промежутке, кВ.

$S_{б}$ – площадь диэлектрического барьера, м².

$\epsilon_{б}$ – диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлен диэлектрический барьер.

$b_{б}$ – ширина диэлектрического барьера, м.

$S_{э}$ – площадь электрода, м².

$\epsilon_{в}$ – диэлектрическая проницаемость воздуха.

$b_{г}$ – ширина воздушного зазора, м.

ВАХ – вольт-амперная характеристика.

$R_{г}$ – активное сопротивление газоразрядного промежутка в момент горения разряда, Ом.

K_L – константа, зависящая от коэффициента диффузии и толщины стационарной жидкой пленки, м/с;

a – поверхность раздела фаз на единицу объема жидкости, м⁻¹.

C^* – концентрация озона в жидкой фазе, равновесная с газовой фазой, г/л.

C – реальная концентрация растворенного озона в жидкости, г/л.

Q_{O_3} – скорость потребления озона при химических реакциях в сточных водах, г/л·с.

p_{O_3} – парциальное давление озона над сточными водами, Па.

$p_{O_3}^г$ – парциальное давление озона в газовой среде, Па.

G – отношение общей площади поверхности капли к общей площади поверхности пузырька в 1 м^3 .

$C_{1;2}$ – число взаимодействий капель первой и второй групп с озоном в единице массы смеси за время Δt .

САУ – система автоматического управления.

F_r – градиентная сила, вызванную неравномерностью концентрации смеси в камере обработки, Н.

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь.

СО – станция очистки навозных стоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарян, А.А. Применение озона в агробiotехнологии / А.А. Азарян, Д.В. Пожидаев, П.П. Паршинцев, А.А. Напольских // В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко, 2017. – С. 1316–1317.

2. Азарян, А.А. Перспектива использования озонозовдушной смеси для очистки жидких навозных стоков / А.А. Азарян // В книге: Итоги научно-исследовательской работы за 2021 год. Материалы Юбилейной научно-патриотической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ, 2022. – С. 678–679.

3. Азарян, А.А. Способ очистки навозных стоков с применением электроозонных технологий / А.А. Азарян // Год науки и технологий 2021 : Сборник тезисов по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 09-12 февраля 2021 года / Отв. за выпуск А.Г. Коцаев. - Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. – С. 122.

4. Азарян, А.А. Установка для комплексной очистки жидкой фракции навозных стоков / А.А. Азарян // В книге: Итоги научно-исследовательской работы за 2021 год. Материалы Юбилейной научно-патриотической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ, 2022. – С. 680–681.

5. Андреева, С. А. Повышение эффективности технологических процессов очистки от органических компонентов в высококонцентрированных сточных водах / С. А. Андреева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 3. – С. 77-88. – DOI 10.25686/2542-114X.2021.3.77.

6. Билалов, Ф.Б. Антимикробная активность некоторых дезинфицирующих средств / Ф.Б. Билалов // Рациональные методы профилактики, диагностики и терапии незаразных болезней животных. Казань, 1993. – С. 43–45.

7. Болога, М.К. Исследование влияния газового разряда на жизнедеятельность микроорганизмов / М.К. Болога, Г.А. Литинский, Л.Ф. Онофращ, В.М. Руденко // Электронная обработка материалов, 1982. – № 2. – С. 62–65.

8. Бородин, И.Ф. Использование электроозонированного воздуха в сельскохозяйственном производстве / И.Ф. Бородин, Н.В. Ксенз // Техника в сельском хозяйстве, 1993. – № 3. – С. 13–14.

9. Бородин, И.Ф. Электроозонные технологии в сельскохозяйственном производстве / И.Ф. Бородин, Д.А. Нормов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2009. – №1. – С. 57–59.

10. Возмилов, А.Г. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в промышленном животноводстве и птицеводстве: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Возмилов Александр Григорьевич. – Челябинск, 1993. – 37 с.

11. Волкова, Е. А. Анализ современных методов обеззараживания воды / Е. А. Волкова, А. А. Гладченко // Сборник научных трудов, посвященный 60-летию кафедры «Технологии, организации, экономики строительства и управления недвижимостью» Кубанского государственного технологического университета : Сборник научных статей. – Краснодар: ИП Кабанов В.Б. (издательство «Новация»), 2024. – С. 743–748.

12. Волошин, А.П. Анализ статических характеристик электроозонаторов применяемых в АПК / А.П. Волошин, Д.А. Овсянников // Физико-технические проблемы создания новых экологически чистых технологий в агропромышленном комплексе: Сборник научных трудов по материалам V Российской научно-практической конференции. -Ставрополь: СтГАУ, 2009. – С. 168–172.

13. Волошин, А.П. Влияние нагрева разрядного устройства на статические электротехнические характеристики электроозонаторов барьерного типа / А.П. Волошин, Д.А. Овсянников // Технические и технологические системы: Материалы международной научной конференции. – Краснодар: КубГАУ, 2009. – С. 254–257.

14. Волошин, А.П. Применение системы жидкостного охлаждения разрядного устройства в электроозонаторах барьерного типа / А.П. Волошин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Краснодар: КубГАУ, 2011. – С. 42–46.

15. Головкин, А. Н. Технологические аспекты очистки навозных стоков / А. Н. Головкин, А. М. Бондаренко // Дальневосточный аграрный вестник. – 2024. – Т. 18, № 1. – С. 65–73. – DOI 10.22450/1999-6837-2024-18-1-65-73.

16. Горячий, И.В. Озоно-воздушная обработка посевного материала и плодовых тел гриба / И.В. Горячий, Г.П. Стародубцева, В.И. Хайновский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. – № 12. – С. 12–14.

17. Гуляев, П.В. Система обеззараживания сухих комбинированных кормов для птичников / П.В. Гуляев, И.Н. Озеров, Т.В. Гуляева [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 95. – С. 423–459.

18. Гуринович, А.Д. Очистка воды от пестицидов улучшенными окислительными технологиями / А.Д. Гуринович, Б.Н. Житенев, Ю.Е. Любчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2018. – № 2 (110). – С. 132–134.

19. Данилова, А.К. Гигиена в промышленном птицеводстве / А.К. Данилова, М.С. Найденский [и др.]. - М. : Россельхозиздат, 1979. – 255 с.

20. Елсуков, А. В. Очистка производственных сточных вод с применением озоновых технологий / А. В. Елсуков, Е. Ю. Сидорова // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта : Межвузовский сборник научных трудов. – Москва : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», 2021. – С. 175–179.

21. Забродина, А. Н. Экологический аспект утилизации отходов животноводства / А. Н. Забродина // Кузбасс: образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие научно-образовательного центра «Кузбасс» : Материалы X Инновационного конвента, Кемерово, 30 января 2022 года. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 291–294.

22. Инновационные методы и технические средства для очистки сточных вод в животноводческих фермах / И. И. Шигапов, О. Н. Краснова, Ю. В. Полякова [и др.] // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : Материалы Национальной научно-практической конференции. В 2-х томах, Ульяновск, 20–21 июня 2019 года. Том 2019-2. – Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2019. – С. 192–196.

23. Интенсификация процесса переработки отходов животноводства / К. О. Фирус, К. В. Анисимова, Н. Г. Главатских [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2(66). – С. 65-70. – DOI 10.48012/1817-5457_2021_2_65.

24. Камалиева, Р. Ф. Технология озонирования как способ очистки питьевой воды в теплоэнергетике / Р.Ф. Камалиева, А.Ю. Власова, А.А. Филимонова // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : материалы IX Национальной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ, Казань, 07-08 декабря 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 330–332.

25. Кириченко, О. Е. Озонирование воды: состояние и перспективы / О. Е. Кириченко, И. П. Баштовой // Научно-техническое творчество по процессам и оборудованию пищевых производств : сборник тезисов докладов всероссийской (с международным участием) научно-практической интернет-конференции преподавателей, молодых ученых и студентов, посвященной 60-летию кафедры оборудования пищевых производств, Донецк, 26–27 октября 2023 года. – Донецк: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», 2023. – С. 35-37.

26. Комарова, Е. В. Экологически безопасные технологии подготовки животноводческих стоков / Е. В. Комарова, М. А. Ляшков // Экология и водное хозяйство. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 72-88. – DOI 10.31774/2658-7890-2021-3-3-72-88.

27. Копылова, О. С. Озонирование - один из наиболее экологически чистых методов дезинфекции / О. С. Копылова, М. А. Афанасьев // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона : VII Всероссийская научно-практическая конференция, Ставрополь, 15–18 мая 2012 года. – Ставрополь: Ставропольское издательство «Параграф», 2012. – С. 138-139.

28. Корса-Вавилова, Е. В. Процесс и аппаратурное оформление озонной обработки воды : дис. ... канд. техн. наук: 2.6.13 / Корса-Вавилова Елена Викторовна. – М., 2024. – 190 с.

29. Косухина, А. И. Проблема негативного воздействия сточных вод животноводства на окружающую среду и пути ее решения / А. И. Косухина, А. Г. Старостин // Химия. Экология. Урбанистика. – 2023. – Т. 1. – С. 119-123.

30. Ксенз, Н. В. Оптимизация коронных озонаторов / Н. В. Ксенз // Разработка и использование средств электромеханизации в животноводстве: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1987. – С. 117–125.

31. Ксенз, Н.В. Совершенствование систем микроклимата в животноводстве на основе электроозонирования / Н.В. Ксенз // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1988. – № 3 (379). – С. 117–120.

32. 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, 1989. – С. 115–119.

33. Ксенз, Н.В. Электроозонирование воздушной среды животноводческих помещений: методические рекомендации / Н. В. Ксенз ; ВНИПТИМЭСХ; под ред. И. Ф. Бородина. – зерноград : ВНИПТИМЭСХ, 1991. – 172 с.

34. Ксенофонтов, Б. С. Влияние озонирования на процесс коагуляции при очистке сточных вод / Б. С. Ксенофонтов, А. В. Бондаренко, Н. Р. Ратушный // Будущее машиностроения России : XVI всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием): сборник докладов. В 2-х томах, Москва, 19-22 сентября 2023 года. - Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 542–547.

35. Курмачева, В. С. Озонирование как способ очистки воды / В.С. Курмачева, Д. А. Солоницына, С. А. Солунин // Уральская горная школа - регионам : материалы научно-практической конференции, Екатеринбург, 10 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 318–319.

36. Лимаренко, Н. В. Создание математической модели технологического процесса обеззараживания стоков животноводства / Н. В. Лимаренко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2017. – № 4(358). – С. 108–112.

37. Лунин, В.В. Озон в очистке сточных вод, удалении цианидов, гидрометаллургии: монография / В.В. Лунин, В.Г. Самойлович, С.Н. Ткаченко, И.С. Ткаченко. – М: МАКС пресс, 2019. – 278 с.

38. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / А.В. Шпилько, В.И. Драгайцев, П.Ф. Тулапин [и др.] ; Министерство сельского хозяйства и продовольствия РФ; Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства. Том Часть 1. – Москва : ГП УСЗ Минсельхозпрома России, 1998. – 219 с.

39. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования / А.Г. Шахназаров, Г.Г. Азгальдов, Н.Г. Алешинская [и др.]. - М.: Информэлектро, 1994. – 141 с.

40. Мунтер, Р.Р. Теория и практика озонирования природных и сточных вод.: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.01 / Мунтер Рейн Романович. - Таллин, 1990. – 50 с.
41. Никифорова, Ю. Ю. Экологическая оценка возможности использования свиного навоза / Ю. Ю. Никифорова // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 77–80.
42. Нормов, Д. А. Определение факторов, влияющих на производительность электроозонатора / Д. А. Нормов, Д. В. Пожидаев, Д. А. Добровольский // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 22 апреля 2019 года / Под общ. ред. Трушкина В.А. - Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. – С. 161–162.
43. Нормов, Д.А. Влияние озоноздушной обработки на фитопатогенную микрофлору в овощехранилище / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 13. – С. 208–210.
44. Нормов, Д.А. Математическое моделирование физических процессов в электроозонаторах барьерного типа / Д.А. Нормов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2008. – №3 (12). – С. 231–235.
45. Нормов, Д.А. Озон против микотоксикозов фуражного зерна / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Федоренко // Сельский механизатор. 2009. – № 4. – С. 24–25.
46. Нормов, Д.А. Влияние воздействия озоноздушной смеси на содержание вредоносной микрофлоры в кормах / Д.А. Нормов, Н.Н. Курзин, А.А. Шевченко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 47. – С. 168–171.
47. Нормов, Д.А. Реализация математической модели электроозонной очистки навоза / Д.А. Нормов, В.А. Драгин, А.А. Азарян [и др.] // Сельский механизатор, 2019. – №1. – С. 34–35.

48. Нормов, Д.А. Реализация математической модели электроозонной очистки навоза / Д.А. Нормов [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 3. – С. 34–35.
49. Нормов, Д.А. Очистка навозных стоков с применением электроозонатора / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, А.А. Азарян // Сельский механизатор, 2020. – №5–6. – С. 30–31.
50. Нормов, Д.А. Оптимизация параметров электроозонной установки / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Федоренко, А.А. Азарян, В.Л. Болотин // Сельский механизатор, 2021. – № 10. – С. 10–14.
51. Нормов, Д.А. Оптимизация параметров электроозонной установки / Д.А. Нормов, Е.А. Федоренко, А.А. Азарян [и др.] // Сельский механизатор, 2022. – № 1. – С. 44–45.
52. Нормов, Д.А. Электроозонная технология очистки навозных стоков: реализация математической модели / Д.А. Нормов, А.А. Азарян, А.А. Цедяков, Д.С. Карлаков // Агроинженерия, 2024. – С. 74–82.
53. Овсянников, Д.А. Повышение энергетической эффективности электроозонаторов / Д.А. Овсянников, Д.А. Нормов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – № 11. – 2004. – 2 с.
54. Овсянников, Д.А. Анализ энергетических процессов в системах электроозонирования применяемых в АПК / Д.А. Овсянников, Д.А. Нормов, С.А. Николаенко, С.А. Шмагайло // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: Материалы III Российской научно-практической конференции. – Ставрополь, 2005. – 4 с.
55. Овсянников, Д.А. Влияние профиля диэлектрических пластин на параметры разрядного устройства электроозонатора / Д.А. Овсянников, Д.А. Нормов // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона: Материалы международной научно-практической конференции. – Ставрополь, 2006. – 4 с.

56. Овсянников, Д.А. Влияние температуры диэлектрических барьеров на производительность электроозонатора / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона: Материалы международной научно-практической конференции. – Ставрополь, 2006. – 4 с.

57. Овсянников, Д.А. Влияния частоты тока на коэффициент мощности разрядного устройства электроозонатора / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, А.П. Волошин // Энерго-и ресурсосберегающие технологии и установки: Материалы пятой Всероссийской конференции. -Краснодар, 2007. – 4 с.

58. Овсянников, Д.А. Математическая модель нагрева разрядного устройства электроозонатора / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко // Энерго-и ресурсосберегающие технологии и установки: Материалы пятой Всероссийской конференции. - Краснодар, 2007. – 4 с.

59. Овсянников, Д.А. Планирование и обработка результатов исследований : учеб. пособие / Д. А. Овсянников, С. А. Николаенко, А. П. Волошин, Д. С. Цокур. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2014. – 76 с.

60. Овсянников, Д.А. Повышение эффективности систем электроозонирования, применяемых в АПК / Д.А. Овсянников, М.Б. Гайнулин, С.А. Николаенко // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропитания для АПК: Сборник трудов КГАУ. - Краснодар, 2006. – 4 с.

61. Орлов В.А. Озонирование воды / В.А. Орлов. - М.: Стройиздат, 1984. – 88 с.

62. Оськин С.В. Рекомендации для выполнения и защиты диссертации: учебное пособие / С.В. Оськин. – Краснодар: КубГАУ. – 2015. – 63 с.

63. Пазова, Т. Х. Переработка и утилизация бесподстилочного навоза / Т. Х. Пазова, А. Х. Габаев // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2022. – № 1(35). – С. 116–120. – DOI 10.55196/2411-3492-2022-1-35-116-120.

64. Патент № 2065407 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/30, С02F 3/28, С02F 11/02. Установка очистки и обеззараживания стоков : № 4913083/26 : заявл. 20.02.1991 : опубл. 20.08.1996 / В. И. Тумченко.

65. Патент № 2136606 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/48, С02F 103/02. Электромагнитное устройство для обработки жидкости : № 98103207/25 : заявл. 10.02.1998 : опубл. 10.09.1999 / Н. И. Богатырев, Н. Н. Курзин, И. В. Жраков [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

66. Патент № 2208922 С1 Российская Федерация, МПК А01С 3/00. Устройство для обеззараживания навозных стоков : № 2002102401/13 : заявл. 25.01.2002 : опубл. 27.07.2003 / Т. А. Сторожук, А. Л. Кулакова, И. А. Потапенко, Ю. С. Сторожук ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

67. Патент № 2301515 С2 Российская Федерация, МПК А01С 3/00, С05F 3/00. Способ переработки навоза : № 2004102997/12 : заявл. 02.02.2004 : опубл. 27.06.2007 / Н. П. Ледин, В. И. Комлацкий, Н. И. Литвяков [и др.] ; заявитель Северо-Кавказский научно-исследовательский институт животноводства (СКНИИЖ).

68. Патент № 2331577 С1 Российская Федерация, МПК С01В 13/11. Генератор озона : № 2007107567/15 : заявл. 28.02.2007 : опубл. 20.08.2008 / Д. А. Нормов, А. А. Шевченко, А. В. Квитко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

69. Патент № 2417159 С2 Российская Федерация, МПК С01В 13/11. Электроозонатор : № 2009126863/05 : заявл. 13.07.2009 : опубл. 27.04.2011 / Д. А. Овсянников, С. А. Николаенко, А. П. Волошин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

70. Патент № 2429192 С2 Российская Федерация, МПК С01В 13/11. Электроозонатор : № 2009133067/05 : заявл. 02.09.2009 : опубл. 20.09.2011 / Д. А. Овсянников, С. А. Николаенко, А. П. Волошин [и др.] ; заявитель Федеральное

государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

71. Патент № 2554743 С1 Российская Федерация, МПК А61L 9/015. способ обеззараживания животноводческих помещений от возбудителей стафилококкоза : № 2014108333/15 : заявл. 04.03.2014 : опубл. 27.06.2015 / В. И. Терехов, Д. А. Нормов, И. В. Сердюченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

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

73. Патент № 2767075 С1 Российская Федерация, МПК С05F 3/00, С05F 11/02. Способ утилизации жидкой фракции животноводческих стоков : № 2021121743 : заявл. 22.07.2021 : опубл. 16.03.2022 / С. И. Харитонов, В. А. Шевченко, Г. И. Бондарева, А. В. Евграфов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова».

74. Патент № 2787785 С1 Российская Федерация, МПК А01С 3/00, С05F 3/00. Способ утилизации животноводческих стоков на органические удобрения и биогаз : № 2022110781 : заявл. 21.04.2022 : опубл. 12.01.2023 / Ю. А. Киров, В. А. Милюткин, Д. Н. Котов [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аграрный университет».

75. Патент № 2800479 С2 Российская Федерация, МПК С02F 9/00, С02F 1/78, С02F 1/461. Установка для очистки сточных, дренажных, скважинных, прудовых вод гражданских и промышленных объектов : № 2021133845 : заявл. 18.11.2021 : опубл. 21.07.2023 / С. В. Созонов.

76. Патент № 2822913 С1 Российская Федерация, МПК С02F 9/00, С02F 1/52, С02F 1/78. Устройство для очистки бытовых и производственных вод : № 2024103426 : заявл. 12.02.2024 : опубл. 16.07.2024 / И. М. Стуров, Д. А. Ивакин, И. В. Титова, Б. Б. Еремеев ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Модуль ЧД».

77. Патент № 2822913 С1 Российская Федерация, МПК С02F 9/00, С02F 1/52, С02F 1/78. Устройство для очистки бытовых и производственных вод : № 2024103426 : заявл. 12.02.2024 : опубл. 16.07.2024 / И. М. Стуров, Д. А. Ивакин, И. В. Титова, Б. Б. Еремеев ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Модуль ЧД».

78. Патент на полезную модель № 216118 U1 Российская Федерация, МПК С02F 1/78, С02F 1/36. Устройство для озонирования : № 2021138919 : заявл. 27.12.2021 : опубл. 17.01.2023 / Д. А. Червяков, А. Н. Федоренко, А. Ю. Тимофеев [и др.] ; заявитель Акционерное Общество Московский Пиво Безалкогольный Комбинат «Очаково».

79. Патент на полезную модель № 224112 U1 Российская Федерация, МПК С02F 1/78, С02F 1/36. Озонатор воды : № 2023133672 : заявл. 18.12.2023 : опубл. 18.03.2024 / И. О. Зубков, И. А. Миненко, М. Ю. Артамонов.

80. Патент на полезную модель № 228987 U1 Российская Федерация, МПК С02F 1/78, С01В 13/11. Устройство озонирования воды : № 2024106607 : заявл. 14.03.2024 : опубл. 18.09.2024 / А. И. Елфимов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Убер Электро».

81. Пилип, Л. В. Химический метод устранения запахов в промышленном сви-новодстве / Л. В. Пилип, М. Э. Казакова // Бутлеровские сообщения. – 2020. – Т. 62, № 4. – С. 88–93. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/20-62-4-88.

82. Пилипенко, М. В. Комбинирование ультразвуковой обработки и озонирования для очистки сточных вод красильных производств / М. В. Пилипенко, А. В. Дубина, В. В. Лихавицкий // Водоснабжение и санитарная техника. – 2023. – № 2. – С. 53–58. – DOI 10.35776/VST.2023.02.07.

83. Пилипенко, М. В. Флотация сточных вод красильных производств с использованием озона / М. В. Пилипенко, А. В. Дубина, В. В. Лихавицкий // Водоснабжение и санитарная техника. – 2023. – № 1. – С. 42-48. – DOI 10.35776/VST.2023.01.06.
84. Пляц, Д. С. Очистка сточных вод рыбоперерабатывающих производств и совместное применение процессов озонирования и сорбции / Д. С. Пляц, М. А. Новикова // Вода: химия и экология. – 2024. – № 10. – С. 64–72.
85. Правила проведения дезинфекции и дезинвазии объектов государственного ветеринарного надзора: утв. Минсельхозом РФ от 15.07.2002 № 13-5-2/0525. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200112793>.
86. Попов, Н.И. Йодез - новое дезинфицирующее средство / Н.И. Попов, Д.И. Удавлиев, В.А. Седов // Ветеринария. – 1999. – №8. – С. 13.
87. Ратушный, Н. Р. Интенсификация процесса коагуляции при озонировании сточных вод / Н. Р. Ратушный // Студенческая научная весна : Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова, Москва, 01–30 апреля 2023 года. - Москва: Издательский дом «Научная библиотека», 2023. – С. 777–778.
88. Самойлов, М. А. Озонирование как способ улучшения качества воды / М. А. Самойлов // Знания молодых – будущее России : Сборник статей XXI Международной конференции, Киров, 05–07 апреля 2023 года. – Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2023. – С. 498-501.
89. Селюков, А.В. Доочистка биологически очищенных городских сточных вод озонированием / А.В. Селюков, М.Ю. Семенов // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. – № 2. –С. 41–45.
90. Сибельдина, Л.А. Озонирование в птицеводстве /Л.А. Сибельдина, В.В. Зуев // Птицеводство. – 1999. – № 4. – С. 34–35.
91. Смирнов, В. А. Экологическая и экономическая эффективность установки обезжелезивания воды новой конструкции на основе озоноздушной смеси / В. А. Смирнов, М. С. Волхонов // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2022. – № 2(39). – С. 92-98. – DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-92-98.

92. Снижение эмиссии запахообразующих веществ в условиях промышленных свиноводческих предприятий / Ю. Н. Терентьев, Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина, Л. В. Пилип // Теоретическая и прикладная экология. – 2019. – № 2. – С. 113-120. – DOI 10.25750/1995-4301-2019-2-113-120.

93. Сторожук, Т. А. Выбор систем обеззараживания животноводческих стоков / Т. А. Сторожук, А. А. Чехов // Стратегии и векторы развития АПК : Сборник статей по материалам национальной конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ, Краснодар, 15 ноября 2021 года / Отв. за выпуск А.А. Титученко. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. – С. 303–305.

94. Сторчевой, В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды в птицеводстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Сторчевой Владимир Федорович. – М., 2004. – 283 с.

95. Сторчевой, В.Ф. Озонирование и ионизация воздушной среды как средство энергосбережения в птицеводстве / В.Ф. Сторчевой // Механизация и электрификация с.-х. – 2004. – № 9. – С.21–22.

96. Телюбаев, Ж. Б. Повышение качества переработки отходов животноводства для получения удобрения / Ж. Б. Телюбаев // АПК России. – 2017. – Т. 24, № 2. – С. 508–515.

97. Тесленко, И.И. Методика оценки и выбора безопасных систем микроклимата животноводческих помещений / И.И. Тесленко, С.Н. Хабаху, Д.А. Нормов // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2013. – № 1–2 (13–14). – С. 77–79.

98. Увеличение эффективности использования электроэнергии при озонировании сточных вод / Н. А. Морозов, А. Я. Шмелев, Э. В. Науменко [и др.] // EurasiaScience : Сборник статей LIX международной научно-практической конференции, Москва, 15 февраля 2024 года. – Москва: ООО АКТУАЛЬНОСТЬ.РФ, 2024. – С. 100–107.

99. Федоренко, Е.А. Озон против микотоксикозов фуражного зерна / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Федоренко // Сельский механизатор. – 2009. – № 4. – С. 24-25.

100. Фурдуй, В. С. Применение озонирования для очистки производственных сточных вод / В. С. Фурдуй, И. Г. Береза // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте - 2020 : труды XXVIII Международной конференции, Новороссийск, 07–12 сентября 2020 года. – Новороссийск: Пензенский государственный университет, 2020. – С. 236–238.

101. Чуркин, М. И. Озонирование и его эффективность в процессе подготовки воды к применению для питьевых целей / М. И. Чуркин // Труды молодых ученых Алтайского государственного университета. – 2021. – № 18. – С. 178–181.

102. Шевченко, А.А. Обеззараживание зерна озонированием/ Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Федоренко // Комбикорма. – 2009. – № 4. – С. 44.

103. Шевченко, А.А. Применение электроозонирования для повышения посевных качеств семян / А.А. Шевченко, Д.А. Нормов // Сельский механизатор. – 2009. – № 1. – С. 14–15.

104. Шевченко, А. А. Дезинфекция субстратов озоновоздушной смесью перед приготовлением биопрепаратов / А. А. Шевченко, Е. А. Денисенко // Научное обозрение. – М.: Наука образования, 2013. – №1. – С. 102–106.

105. Шевченко, А. А. Влияние озоновоздушной смеси на вредоносные микроорганизмы, содержащиеся в субстратах / А. А. Шевченко, Е. А. Сапрунова, Е. А. Денисенко // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №100. – С. 772–785.

106. Экспериментальные исследования влияния озонирования на процесс водоподготовки при проектировании генератора озона / Е.В. Корса-Вавилова, Э.В. Науменко, А.Я. Шмелев, А.Е. Макеев // Chemical Bulletin. - 2023. - Т. 6, № 1. – С. 30–40.

107. Effectiveness of treatment of bedding and feces of laboratory animal with ozone / J. J. Qiao, Sh. Ni. Wang, J. J. Li [et al.] // PLoS ONE. – 2022. – Vol. 17, No. 4. – P. e0266223. – DOI 10.1371/journal.pone.0266223.

108. Formation of transformation products during ozonation of secondary wastewater effluent and their fate in post-treatment: From laboratory- to full-scale / R. Gulde, M. Rutsch, B. Clerc [et al.] // Water Research. – 2021. – Vol. 200. – P. 117200. – DOI 10.1016/j.watres.2021.117200.

109. Ibragimov, M. Study on two-step ozone treatment of liquid effluents from livestock farms / M. Ibragimov, A. S. Berdishev, I. E. Tadjibekova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1142, No. 1. – P. 012007. – DOI 10.1088/1755-1315/1142/1/012007.

110. Impact of the Application of Gaseous Ozone on Selected Pathogens Found in Animal Shelters and Other Facilities / V. Vojtkovská, D. Lobová, E. Voslářová, V. Večerek // Animals. – 2023. – Vol. 13, No. 20. – P. 3230. – DOI 10.3390/ani13203230.

111. Lazarova, V. Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse / V. Lazarova, P. - A. Liechti, P. Savoye, R. Hausler // Journal of Water Reuse and Desalination. December 2013;3(4):337-345. – DOI: 10.2166/wrd.2013.007. – URL : https://www.researchgate.net/publication/270437379_Ozone_disinfection_Main_parameters_for_process_design_in_wastewater_treatment_and_reuse.

112. Lim, S. Ozonation of organic compounds in water and wastewater / S. Lim, JL Shi, von Gunten U, DL McCurry // A critical review. Water Res. 2022 Apr 15;213:118053. doi: 10.1016/j.watres.2022.118053. Epub 2022 Jan 10. PMID: 35196612. - URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35196612/>.

113. Mireia, M.E. Ozonation of municipal wastewater for water reuse. Programa de doctorat de ciènciatecnologiadel materials. Published Universitat de Barcelona, 2017. 219 p. - URL: <http://hdl.handle.net/10803/402548>.

114. Ozonation of lake water and wastewater: Identification of carbonous and nitrogenous carbonyl-containing oxidation byproducts by non-target screening / J. Houska,

T. Manasfi, I. Gebhardt, U. Von Gunten // *Water Research*. – 2023. – Vol. 232. – P. 119484. – DOI 10.1016/j.watres.2022.119484.

115. Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review / S. Lim, U. Von Gunten, J. L. Shi, D. L. Mccurry // *Water Research*. – 2022. – Vol. 213. – P. 118053. – DOI 10.1016/j.watres.2022.118053.

116. Ozone and related oxidants for water treatment. Programme and Book of Abstracts. International ozone association. Published Tongji University. Shanghai, China, December 2-3, 2013. - 71 p.- URL: <https://www.ioa-ea3g.org/fileadmin/documents/IOA-Conference-Shanghai-2013-Book-of-abstracts.pdf>.

117. Ozone disinfection of waterborne pathogens and their surrogates: A critical review / Ch. M. Morrison, S. Hogard, R. Pearce [et al.] // *Water Research*. – 2022. – Vol. 214. – P. 118206. – DOI 10.1016/j.watres.2022.118206.

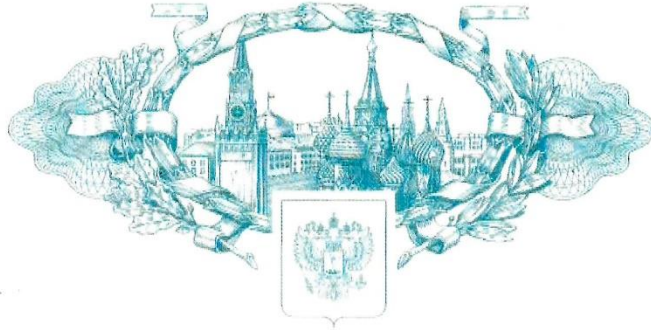
118. Stabilisation of Ozone in Water for Microbial Disinfection / E. I. Epelle, M. E. Rateb, M. Yaseen [et al.] // *Environments*. – 2022. – Vol. 9, No. 4. – DOI 10.3390/environments9040045.

119. Wang, J. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective / J. Wang, H. Chen // *Science of The Total Environment*. 2020;704:135249. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135249.

120. Ozone pest control of grain / I. V. Baskakov, V. I. Orobinsky, A. M. Gievsky [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023 – Vol. 1138, No. 1 – P. 12026 – DOI 10.1088/1755-1315/1138/1/012026.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2688610

Способ очистки навозных стоков

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Азарян Александр Ашотович (RU), Нормов Дмитрий Александрович (RU), Нормова Мирослава Дмитриевна (RU), Нормова Надежда Дмитриевна (RU), Пожидяев Денис Владимирович (RU)*

Заявка № 2018124118

Приоритет изобретения 02 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 21 мая 2019 г.Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 02 июля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.Л. Назиев Г.Л. Назиев

СИСТЕМА ИННОВАЦИОННЫХ АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ «ИННОВАТЕХ»



Завод Агропромышленного Оборудования
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС
« И Н Н О В А Т Е Х »

www.zavodapo.ru

www.td-innovatek.com

353897, РФ, Краснодарский край
Приморско-Ахтарский р-н, х. Морозовский,
ул. Ленина, д.12

Т/ф.: +7 (861) 435-86-58
E-mail: info@zavodapo.ru
Skype : [zavod-ofis1](https://www.skype.com/partners/zavod-ofis1)

СТАНЦИЯ
ОЧИСТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ
СОНС-ЭМО-01

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

« СТАНЦИИ ОЧИСТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ » СОНС-ЭМО-01

Наименование оборудования:	Станция очистки навозных стоков
Марка оборудования:	СОНС-ЭМО-01
Разработчик оборудования :	Инновационный Центр «Инноватех»
Производитель оборудования:	ООО «Производственный комплекс «Инноватех»
Дата производства:	2021 год
Место испытаний:	Действующий свинокомплекс 12, 5 тыс.г. Краснодарский край.

Навоз из корпусов свинокомплекса сливался в навозоприемник и в дальнейшем подвергался разделению шнековым сепаратором (Рис. 1) с размером ячейки сита 0,5 мм на фракции:

- жидкая фракция с содержанием сухих веществ – 1,46 %;
- твердая фракция с содержанием взвешенных веществ и органических загрязнений с остаточной связанной влагой – 70 %.



Рис. 1. Шнековый сепаратор

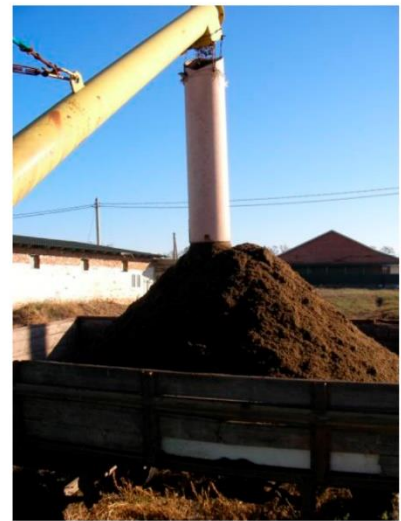


Рис. 2. Твердая фракция разделенного навоза

Твердая фракция (Рис. 2) перевозилась на специальные площадки компостирования с целью ее обеззараживания, дегельминтизации и удаления запаха.

Жидкая фракция сливалась в бетонный бункер-накопитель.

На бетонном перекрытии бункера-накопителя была установлена «Станция очистки навозных стоков» (в дальнейшем по тексту «СО»), рис. 3.



Рис. 3. Станция очистки навозных стоков

Из бункера-накопителя отжатая жидкость погружным насосом (рис. 4) по гибкому трубопроводу через быстросъемные соединения (Рис.5) подавалась в приемный трубопровод СО (Рис. 4). Производительность насоса – 8 м³.



Рис. 4. Погружной насос



Рис. 5. Подключение подачи и слива

В рабочих камерах «Станции» навозные стоки проходили 5 этапов комплексной очистки без применения фильтрующих материалов и химических препаратов, без отходов и иных негативных составляющих.

Выделенные из навозных стоков механические включения и коллоидные составляющие (Рис. 6) возвращались в навозоприемник и в последствии сепарировались в составе твердой фракции.



Рис. 6. Вещества, выделенные из жидкой фракции навоза после сепаратора

При этом в навозоприемнике и бункере-накопителе отжатой жидкости создавалась специфическая поверхностная пена (Рис. 7), которая препятствовала выделению аммиака и др. летучих веществ в атмосферу, существенно снижался специфический запах навоза на всем участке накопления и разделения навоза.



Рис. 7. Поверхностная пена с «жесткой» структурой и активным веществом

После прохождения через рабочие участки СО навозные стоки сливались в накопитель очищенных стоков (Рис. 8) или в контрольную емкость (Рис. 9).



Рис. 8. Бетонный накопитель стоков



Рис. 9. Контрольная емкость 2,14 м³

«Станция очистки» работала в непрерывном автоматическом режиме с производительностью 4 м³ в час по очищенным стокам.

Общая эксплуатационная электрическая нагрузка СО – 6 кВт.
Результаты анализов первого этапа испытаний СО представлены в Таблице № 1.

ХАРАКТЕРИСТИКА СВИНЫХ НАВОЗНЫХ СТОКОВ на различных этапах очистки и утилизации

Таблица № 1

№	Критерий оценки	Навоз натуральный		Навозные стоки после сепаратора	Навозные стоки после СТАНЦИИ	Норма очистки		НД на метод измерений
		Средние статистиче- ские	Факти- ческий			НТП 17-99	СанПин 2.1.7.573 -1996	
1 МЕХАНИЧЕСКИЙ СОСТАВ, %								
1.1	Вода	90,1		98,6				ПНД Ф 14.1:2.110-97
1.2	Взвешенные вещества	9,9	3,68	1,4	0,40(0,10)	0,12		ПНД Ф 14.1:2.110-97
1.3	Коллоидные вещества	1,8		0,3				
2 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, %								
2.1	рН		7,70		7,90			ФР.1.31.2007.03794 (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97)
1.2	АЗОТ							
	- общий	0,67	1,380		0,20(010)	0,12		
	NH ₄ - Азот аммонийный		1,742			0,08		ФР.1.31.2010.07603
	NO ₃ - Азот нитратный		0,010			0,02		ФР.1.31.2005.01724
	NO ₂ - Азот нитритный		0,011			0,02		ПНД Ф 14.1:2:4.3-95
1.2	Фосфор общий (P ₂ O ₅)	0,44	0,582	0,34	0,02	0,09		ПНД Ф 14.1:2.106-97
1.3	Фосфат - ион		0,172					ПНД Ф 14.1:2:4.112-97
1.4	Калий (K ₂ O)	0,54	1,940		0,03	0,21		ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000

2 ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ							
2.1	Запах						
	Классификация Усл. обозн. Интенсивность Балл	Навоз- ный Др V	Навоз- ный Др V	Навоз- ный Др V	Навоз- ный Др !!		
2.2	Мутность	Сильная	Сильная	Сильная	Мутная		
2.3	Цветность	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя		
2.4	Прозрачность	Сильно мутная	Сильно мутная	Сильно мутная	Мутная		
3 МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ - Бактерии, тыс. кл. / г							
3.1	Аэробные бактерии	7,5 x 10		7,5 x 10	Нет	Не допустимы	
3.2	Анаэробные бактерии	2 x 10		2 x 10	Нет	Не допустимы	
3.3	Колiformы	3,8 x 10		3,8 x 10	Нет	Не допустимы	
3.4	Энтерококки	1,2 x 10		1,2 x 10	Нет	Не допустимы	
3.5	Стафилококки	0,5 x 10		0,5 x 10	Нет	Не допустимы	
3.6	Лактобациллы	2,4 x 10		2,4 x 10	Нет	Не допустимы	
3.7	Аэробные споры	4,9 x 10		4,9 x 10	Нет	Не допустимы	

3.8	Клостридии	1,8 x 10		1,8 x 10	Нет	Не допустимы	
3.9	Сальмонеллы	4,0 x 10		4,0 x 10	Нет	Не допустимы	
3.10	Грибы	3,1 x 10		3,1 x 10	Нет	Не допустимы	
4 ВЕТЕРИНАРНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ							
4	Наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, кл./г., в том числе энтеробактерий						
4.1	(патогенных серовариантов кишечной палочки, протей, сальмонелл.), энтерококков (стафилококков, бацилл, клостридий, энтеровирусов)	Да	Да	Да	Нет	Не допустимы	
4.2	Наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, экз./кг, в том числе нематод (аскаридаг, трихоцефалов, стронгилид, стронгилюидов), трематод, цестод	Да	Да	Да	Нет	Не допустимы	
4.3	Цисты кишечных патогенных простейших, экз./100 г	Да	Да	Да	Нет	Не допустимы	
4.4	Наличие личинок и куколок синантропных мух, экз./кг	Да	Да	Да	Нет	Не допустимы	

5 ПОТРЕБНОСТЬ КИСЛОРОДА, мг/л						
5.1	БПК полная	99 792	35 521		75	Пр.МПП №87 от 13.04.09
5.2	БПК5		24 840			ФР.1.31.2007.03796 (ПНД Ф 14.1.2:3.4.123-97)
5.3	ХПК к массе органического вещества	118 800	40 800		300	ПНД Ф 14.1.2:4.190-03

ПРИМЕЧАНИЕ:

НТП 17-99 - «Нормы технологического проектирования систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета»
 СанПин 2.1.7.573-96 - Санитарные правила и нормы "Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения"

1). Качество сточных вод и их осадков, используемых для орошения, регламентируется по химическим, бактериологическим и паразитологическим показателям.

Допустимая концентрация тяжелых металлов в сточных водах устанавливается в зависимости от оросительной нормы и определяется в каждом конкретном случае расчетным способом в соответствии с действующими требованиями к качеству сточных вод и их осадков, используемых для орошения и удобрения.

Сточные воды с контрольными показателями, не превышающими ПДК, в т.ч. микроэлементы и тяжелые металлы, могут использоваться для хозяйственного применения и орошения без ограничений.

2). Степень обеззараживания (дезиннации, дезинфекции) всех видов навоза определяют:

- по отсутствию или гибели возбудителей паразитарных болезней(яиц и личинок гельминтов, цист и ооцист паразитических простейших);
- по гибели индикаторных (санитарно-показательных) микроорганизмов в 10 см³ пробы навоза, контаминированного малоустойчивыми возбудителями болезней (по выживаемости бактерий группы кишечной палочки), возбудителей повышенной устойчивости (стафилококкам), спорообразующей микрофлоры (по микробам бациллус).

3). При механическом способе аэрации степень очистки жидкой фракции следует принимать: по ХПК - до300 мг/л, содержание взвешенных веществ - до 120 мг/л, азота - до 120 мг/л, фосфора - до 90 мг/л, кальция - до 210 мг/л.

АНАЛИЗ полученных объективных и субъективных результатов испытаний «**СТАНЦИИ ОЧИСТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ**» позволили сформулировать следующие выводы и предположения:

1. Принципиально, «Станция очистки навозных стоков» позволяет в непрерывном режиме без химических препаратов, вредных сбросов и сменных фильтров за несколько часов получить результат – аналогичный 6...12 месячному процессу в дорогостоящих сооружениях с массой сопутствующих негативных факторов в финансовом, техническом и экологическом планах. Показатели стоков соответствуют или ниже допустимых параметров, определенных НТП 17-99. При этом многие результаты анализа обработанных стоков находятся ниже предела обнаружения с использованием стандартных общепринятых методик измерения и являются условно подтвержденными метрологическими характеристиками.

2. Работа «Станции» сопровождается одновременным улучшением экологической обстановки на технологических участках вокруг и рядом с местом установки Станции.

3. «Станция» позволяет выделить из навозных стоков не только крупные и мелкодисперсионные механические составляющие, но и коллоидные вещества, не задерживаемые фильтрами и аналогичными приспособлениями.

4. Расслоение неразделенных и разделенных навозных стоков в спокойном состоянии проявляется уже в течение 20...30 минут, а после «Станции» расслоение не наступает и через 2-е суток, в стоках остаются только взвешенные растворенные вещества и крайне незначительные пылеобразные механические примеси. Не происходит заиливание накопителей, образование донных отложений. Не требуется дорогостоящего перемешивающего и специального насосного оборудования. Коэффициент полезного использования накопителей (лагун) повышается а эксплуатационные затраты на последующие подготовку, откачку, транспортировку и внесение навозных стоков снижаются на 30-40 %. Не говоря уже о стоимости высвободившихся объемов накопителей и пленочных лагун.

5. Навозные стоки после «Станции» могут в дальнейшем использоваться и применением любых агротехнических и мелиоративных средств без дополнительной фильтрации. При этом нормы внесения навозных стоков в значительной мере будут определяться не химическими и органолептическими показателями, а поглотительной способностью сельскохозяйственных полей орошения, количество и площади которых могут быть снижены на «порядок» – в 10...15 раз.

6. При использовании «Станции очистки» территории последующих накопления и внесения навозных стоков не представляют экологическую проблему, специфический запах навоза не ощущается далее 50 м, а при традиционной технологии запах ощущается на удалении от 1 км и более. Отпадает необходимость поверхностного закрытия накопителей или пленочных лагун дорогостоящими приспособлениями (пленочными «колпаками» с поплавковыми камерами и т.п.) или специальным оснащением. Исключаются вредные выбросы экологически вредных летучих соединений в атмосферу во

время накопления и хранения навозных стоков, а также при внесении навозных стоков не сельскохозяйственные поля орошения.

7. Снимаются экологические проблемы эксплуатации животноводческих комплексов в непосредственной близости (до 300 метров) с населенными пунктами, а также при ограниченных площадях сельскохозяйственных полей орошения или их отсутствии, при близком расположении естественных водоемов или высоких грунтовых водах.

8. Полученные в результате работы «Станции» навозные стоки обладают сильным стерилизующим эффектом последствием.

Микробиологический способ анализа подтверждает относительную «стерильность» обработанных навозных стоков.

При биохимическом анализе полученные в результате обработки навозные стоки являются абсолютно губительными (условно «токсичными») для используемых инфузорий – еще минимум 2 недели, пока полученные стоки не нормализуются или («выветрятся») или не среагируют с другими веществами. Что оказывает положительное воздействие на другую жидкость в накопителе, с которой будут смешиваться обработанные стоки. При этом для растений (сельскохозяйственные культуры) и животных (кролики, мыши и т.п.).

9. По технологии физико-механической обработки навозных стоков можно оснастить и накопительные ванны для навоза под сетками с животными в производственных корпусах. Это решение позволит исключить выделение аммиака и др. летучих соединений над поверхностью ванны и проводить обработку навоза уже в производственных корпусах. Атмосфера в производственном корпусе нормализуется в течение 4...6 часов после включения специального оборудования. Энергетическая мощность оборудования для оснащения корпусов с животными на одну ферму 4 кВт. При этом нормализуется экологическая обстановка вокруг фермы, существенно снижается выброс вредных веществ вентиляционной системой производственных корпусов. Улучшаются физиологическое состояние животных, условия работы обслуживающего персонала и, как следствие, экономический, финансовый и социальный эффект.

10. Высокую эффективность «Станция очистки навозных стоков» будет иметь при очистке отработанной биомассы после реакторов «Био-газовых установок», особенно распространенных в Европе. Эффективность будет определяться тем, что подавляющая часть отработанной биомассы приходится на мелкодисперсионные «глинообразные» взвешенные частицы и коллоидные соединения, которые не задерживаются шнековыми сепараторами, центрифугой и иными аналогичными устройствами, а любые фильтры вообще не приемлемы.

Директор ООО «ПК «Иноватех»



Саприна О.Ф.

«Утверждаю»

Директор

ООО «Производственный комплекс «ИННОВАТЕХ»

Саприна О.Ф.

20 ноября 2021 года

АКТ



внедрения электроозонирующего оборудования в технологический процесс дезактивации стоков свиноводческих ферм

Настоящий акт составлен в том, электроозонатор «Титан», внедрен как составная часть установки для дезактивации стоков свиноводческих ферм комплексным методом, разработанной в ООО «ПК «ИННОВАТЕХ» под руководством к.т.н. Перегудова С.А. Электроозонатор «Титан» разработан авторским коллективом (Шевченко А.А., Пожидаев Д.В., Азарян А.А., Сулейманов А.Э.) МИП «Электротехнология» и кафедры физики КубГАУ.

Проведенные испытания на свиноводческом комплексе «Новые аграрные технологии» (Выселковский район, Краснодарский край) показали высокую эффективность разработанного электроозонирующего оборудования в части удаления неприятных запахов и общей дезактивации стоков, в составе установки для очистки стоков в технологическом процессе свиноводческих ферм.

Полученные результаты позволили запустить мелкосерийное производство установки очистки стоков.

ООО «Производственный комплекс «ИННОВАТЕХ»

Гл. инженер

(Казаков Ю.В.)

Гл. энергетик

(Скоба С.Л.)