

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
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Научный руководитель: **Шевченко Андрей Андреевич**,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ

Официальные оппоненты: **Шмигель Владимир Викторович**,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Электрификация»

Чернышов Алексей Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Донской ГАУ).

Защита диссертации состоится «19» июня 2026 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.033.02 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» по адресу: 196601, Россия, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе 2, ауд. 2113. Тел. +7(812)470-04-22, e-mail: ds431_2@spbgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» www.spbgau.ru и ВАК – <https://vak.minobrnauki.gov.ru> при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 35.2.033.02,
доктор технических наук, профессор

**Огнев
Олег Геннадьевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение продовольственной безопасности России на прямую 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 накопите-

лей, 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 озонвоздушной смеси, 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 озонозонодушной 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 озонозонодушной 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 озоновооздушной смеси с жидкой фракцией навозных стоков.

3. Методика обеззараживания жидкой фракции навозных стоков озоновооздушной смесью.

Теоретическая и практическая значимость результатов проведенных исследований. На основании экспериментальных исследований подтверждена эффективность применения озоновооздушной смеси для угнетения стафилококков и колиформ, содержащихся в жидкой фракции навозных стоков. Определены режимы и параметры электроозонирования при которых уровень вредоносной микрофлоры снижается до нуля, что позволяет рекомендовать, предлагаемый способ обработки навозных стоков, к внедрению на животноводческих комплексах.

Разработанная математическая модель, описывающая массопередачу озона жидкой фракции навозных стоков и абсорбцию озона в камере обработки под воздействием электрического поля, позволила выявить более рациональный способ обработки жидкой фракции навозных стоков. Установлено, что распыление жидкой фракции в камеру обработки заполненную озоновооздушной смесью позволяет значительно увеличить абсорбцию озона и как следствие снизить время обработки.

Полученные в ходе диссертационного исследования характеристики, описывающие влияние конструкционных параметров газоразрядного блока на электрические параметры генератора озона позволят улучшить качество предпроектных исследований и разрабатывать энергоэффективные и экономически целесообразные решения, гарантируя снижение капитальных и эксплуатационных затрат при конструировании.

Предложенные автором функциональная схема автоматизации технологического процесса очистки навозных стоков и алгоритм работы системы автоматического управления позволят, инженерным подразделениям сельхозтоваропроизводителей, разработать программное обеспечение для прошивки микропроцессора системы управления, а также подобрать оборудование ЩАУ с учетом собственных предпочтений в части формирования автоматизированных систем.

Положения, выносимые на защиту:

– зависимости, позволяющие определить наиболее рациональное сочетание конструктивных параметров газоразрядного блока для получения максимального коэффициента мощности генератора озона.

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

– параметры озонирования для угнетения патогенной микрофлоры, содержащейся в жидкой фракции навозных стоков свиноводческих комплексов.

Степень достоверности результатов проведенного исследования (научных положений, выводов и рекомендаций) базируется на строго доказанных и корректно используемых зависимостях фундаментальных и прикладных наук, положений, в которых нашли применение предложенные автором методики определения электрических параметров газоразрядного блока генератора озона, модель взаимодействия озонородной смеси с распыляемой в камеру обработки жидкой фракции навозных стоков и статистические модели, позволяющие определить степень угнетения патогенной микрофлоры, содержащейся в навозных стоках свиноводческих комплексов. Теоретические изыскания, представленные в диссертационной работе, полностью согласуются с известными теоретическими положениями науки, а также подтверждаются совпадением результатов математического и физического моделирования.

Реализация результатов исследования. Данные, представленные в работе, подтверждены производственными испытаниями, 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).

Личный вклад автора:

– принимал активное участие в разработке способа очистки навозных стоков, уникальность которого подтверждена патентом на изобретение РФ № 2688610 от 21 мая 2019 г.;

– участвовал в разработке математической модели взаимодействия озонородной смеси с жидкой фракцией навозных стоков в камере обработки стоков;

– проводил лабораторные и производственные экспериментальные исследования, направленные на определение влияния конструктивных параметров газоразрядного блока генератора озона на его электрические характеристики;

– провел анализ результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, и определил наиболее эффективное сочета-

ние конструкционных параметров газоразрядного блока генератора озона;

– на основании проведенных экспериментальных исследований установил технологически эффективные режимы и параметры процесса озонирования для обеззараживания жидкой фракции навозных стоков.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 патент РФ на изобретение (№ 2688610) и 6 статей в прочих изданиях. Общий объем публикаций составляет 5,1 п. л., из которых 1,7 п. л. принадлежит лично автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 120 источников и 3 приложений. Общий объем диссертации 161 страница машинописного текста, включая 42 рисунка и 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность исследований и степень разработанности темы. Приведены цель и задачи исследований, объект и предмет исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов исследований.

В первой главе, раскрывается востребованность дезинфекции навозных стоков свиноводческих комплексов, оснащенных гидросмывом. Данный метод очистки свиноводческих помещений характеризуется образованием большого количества сточных вод, которые содержат высокую концентрацию вредоносных микроорганизмов. 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.

Рассмотрены достижения ученых в области обеззараживания навозных стоков различными способами. Раскрыты недостатки известных технических решений, основными из которых являются: применение лагун, а также химические, биохимические и физические методы обеззараживания. Однако все выше перечисленные способы не позволяют обеззаразить сток без вреда экологии и образования дополнительных токсичных химических соединений.

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.

На основании анализа литературных источников, нами было принято решение о проведении собственного исследования, результаты которого подтвердили эффективность использования озон-воздушной смеси в области уничтожения санитарно-значимых бактерий и микроорганизмов, содержащихся в навозных стоках.

Во второй главе получены математические зависимости, позволяющие определить степень влияния конструкционных 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. Результаты расчетов представлены в графической форме на рисунке 1.

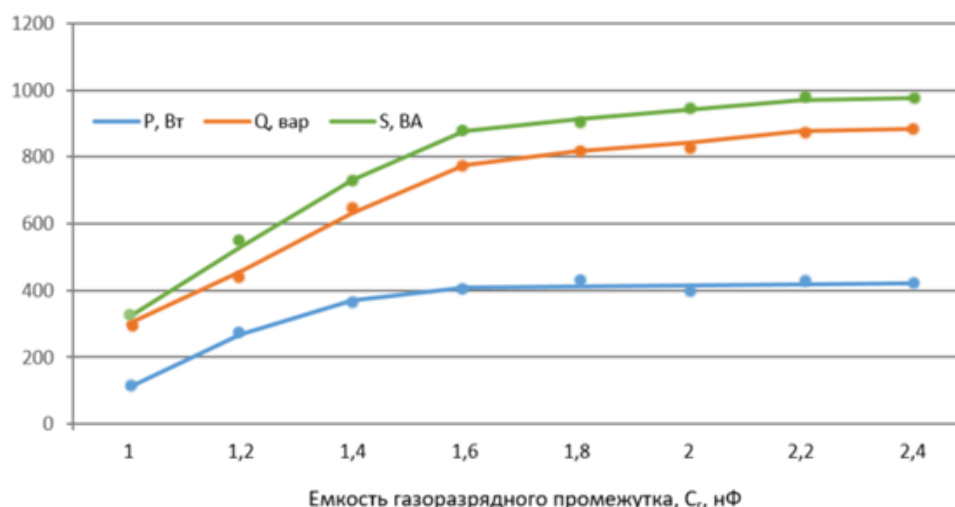


Рисунок 1 – Влияние емкости газоразрядного промежутка на активную, реактивную и полную мощности генератора озона при горящем разряде

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 (рисунок 2).

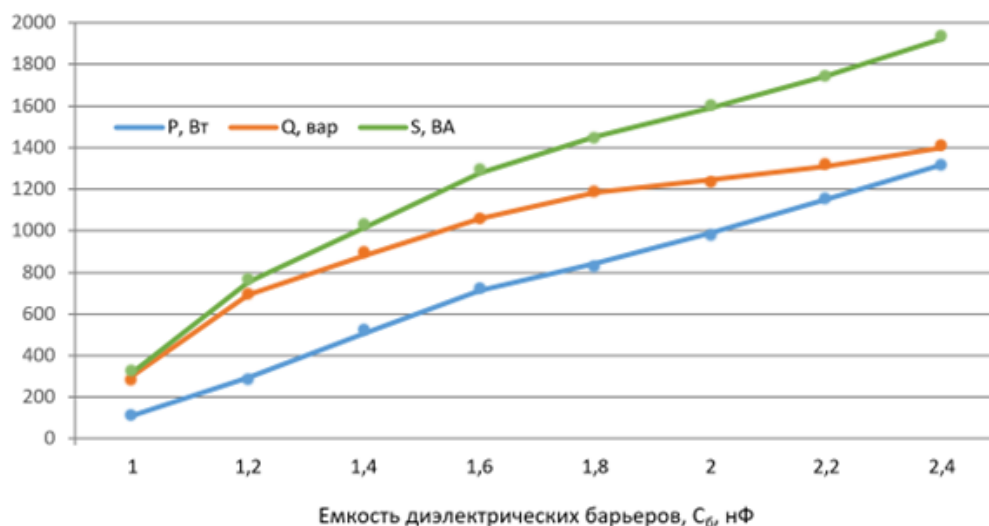


Рисунок 2 – Влияние емкости диэлектрических барьеров на активную, реактивную и полную мощности генератора озона при горящем разряде

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 $\cos\phi$ при этом составил 0,012. Незначительное увеличение $\cos\phi$ связано с емкостным характером нагрузки генератора озона.

Помимо этого, получены математические модели поглощения озона в камере обработки при барботировании озона в жидкую фракцию навозных стоков и распылении жидкой фракции в газовую среду.

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 3).

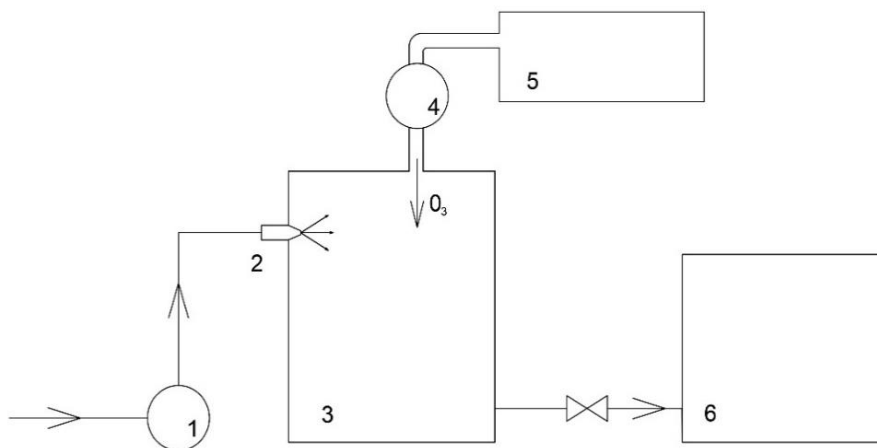


Рисунок 3 – Технологическая схема озонирования навозных стоков:
1 – нагнетающий насос; 2 – форсунка; 3 – камера обработки; 4 – вентилятор, нагнетающий озон; 5 – озонатор; 6 – камера для обработанных стоков

Для получения жидкой фракции навозные стоки подвергаются двум этапам очистки – флотации и центрифугированию, которые позволяют отделить твердую фракцию от жидкой. После чего жидкая фракция подается насосом на механические форсунки. Мелкодисперсное распыление с помощью форсунок позволяет создать туман в камере обработки. Форсунки подбираются таким образом, чтобы получить капли диаметром от 1 до 10 мкм. В камере, полученный туман, обрабатывается озоновоздушной смесью высокой концентрации.

Для определения влияния увеличения поверхности межфазового взаимодействия на эффективность процесса приведена система уравнений (1), описывающая данный процесс. 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.

$$\left\{ \begin{array}{l} grad C_{O_3} = f \left(G; \frac{a_2}{a_1}; S_{общ1}/S_{общ2} \right); \\ V_1 = \frac{4}{3} \pi R_1^3; S_1 = \pi d_1^2; n_1 = \frac{1}{v_1}; \\ V_2 = \frac{4}{3} \pi R_2^3; S_2 = \pi d_2^2; n_2 = \frac{1}{v_2}; \\ S_{общ1} = S_1 n_1; S_{общ2} = S_2 n_2; G = \frac{S_{общ2}}{S_{общ1}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Сравнительный анализ данных, полученных в ходе математического моделирования, 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 %.

В третьей главе описаны результаты проведенных нами экспериментальных исследований, направленных на подтверждение теоретических положений, полученных в работе. Для определения влияния конструкционных параметров газоразрядного блока на электрические параметры генератора озона сконструирована лабораторная установка, схема которой приведена на рисунке 4.

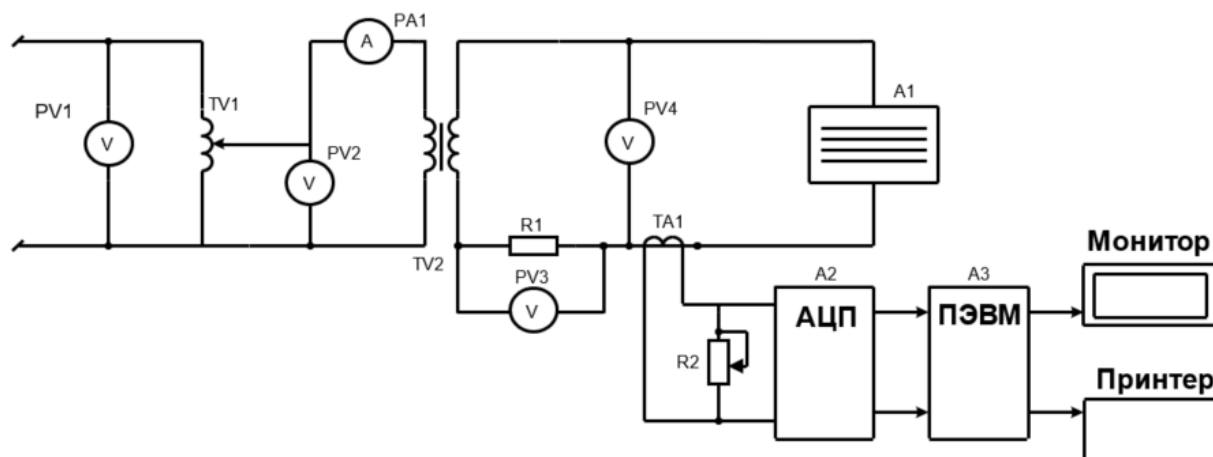


Рисунок 4 – Схема лабораторной установки для исследования параметров электроозонатора

Лабораторная установка питалась от сетевого источника напряжения 220 В, для изменения питающего напряжения, в диапазоне от 200 В до 260 В, использовали ЛАТР, с выводов которого напряжение подавалось на первичную обмотку повышающего трансформатора. Вторичную обмотку трансформатора соединяли с выводами генерирующего блока генератора озона. Установка содержит измерительные приборы, для фиксации показаний в режиме реального времени.

Схему замещения генератора озона после зажигания разряда представим следующим образом (рисунок 5):

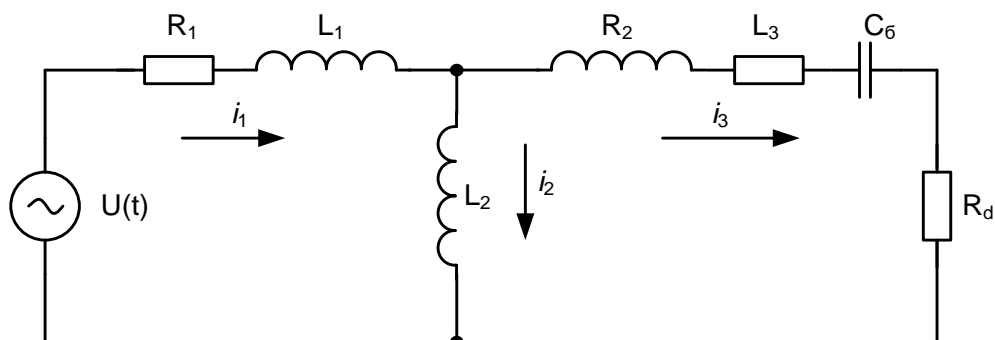


Рисунок 5 – Схема замещения генератора озона при горящем разряде

Для представленной схемы составим систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа, которая позволит математически описать электрические взаимосвязи между элементами схемы. После математического преобразования уравнение, характеризующее процессы, протекающие в разрядном промежутке при горящем барьерном разряде примет вид:

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

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_r) и активного сопротивления (R_r) газоразрядного промежутка.

На начальном этапе было необходимо определить материал для изготовления диэлектрических барьеров. 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 вольт-амперные характеристики (ВАХ), представленные на рисунке 6.

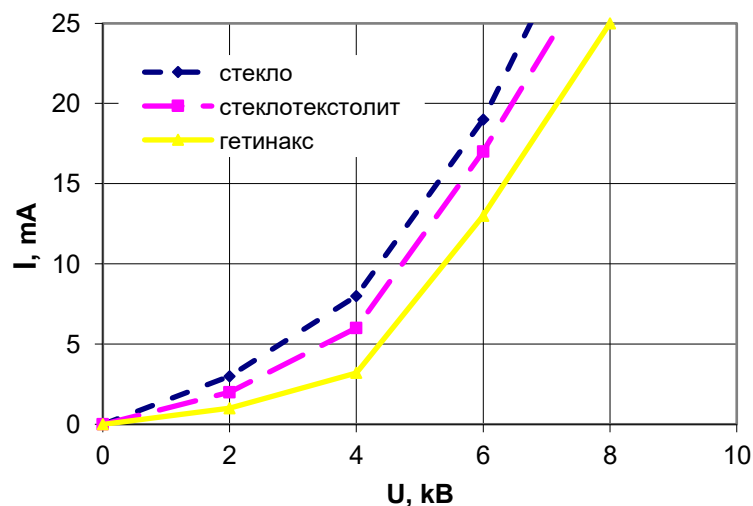


Рисунок 6 – ВАХ разрядного блока с различными материалами диэлектрических барьеров

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

На рисунке 7 представлены вольт-амперные характеристики при различной ширине воздушного промежутка от 1 до 4 мм, при постоянной ширине диэлектрических барьеров 2 мм.

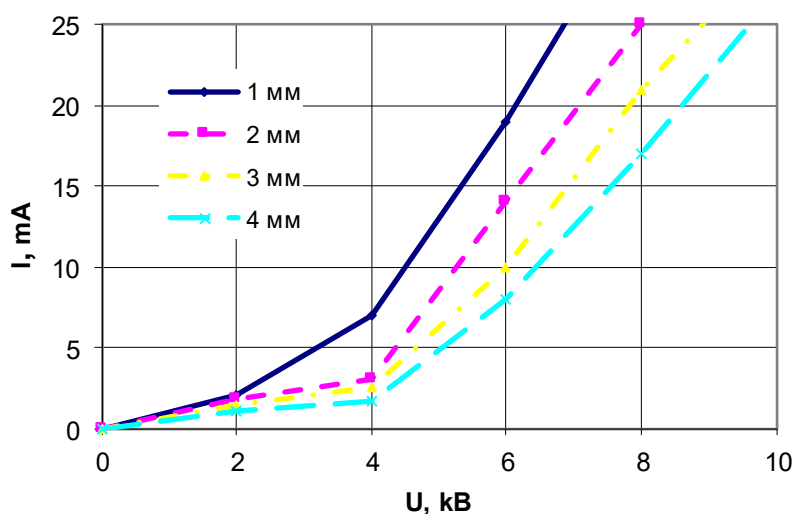


Рисунок 7– ВАХ разрядного блока с различной шириной воздушного промежутка

Анализ характеристик показывает значительное увеличение тока при уменьшении ширины воздушного промежутка. Таким образом, при ширине воздушного зазора равной 1 мм нами получена наибольшая мощность при равных напряжениях. 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.

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 8.

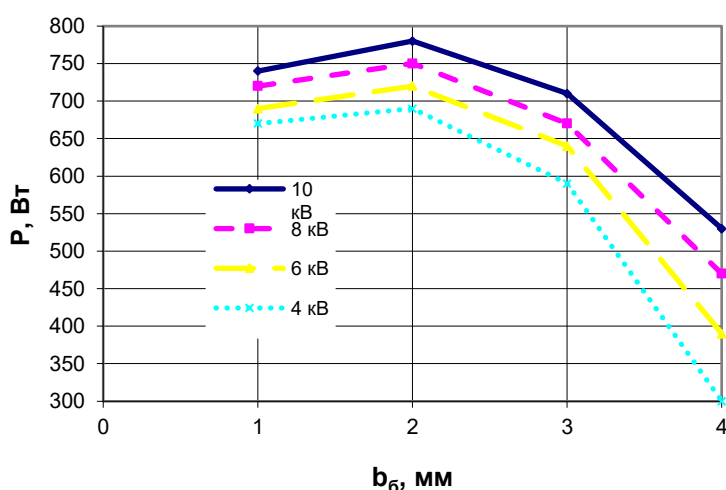


Рисунок 8 – Влияние ширины диэлектрического барьера (b_6) на активную мощность газоразрядного блока генератора озона при различных уровнях приложенного напряжения

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 обра-

зом, 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.

Также *в третьей главе* приведены результаты экспериментальных исследований влияния озоновооздушной смеси на вредоносные микроорганизмы, содержащиеся в жидкой фракции навозных стоков. Для подтверждения теоретических исследований разработана испытательная станция, которая включает в себя несколько этапов очистки. Первый этап – механическая очистка флотатором и сепаратором для отделения крупной фракции стоков. Второй этап – обеззараживание озоновооздушной смесью.

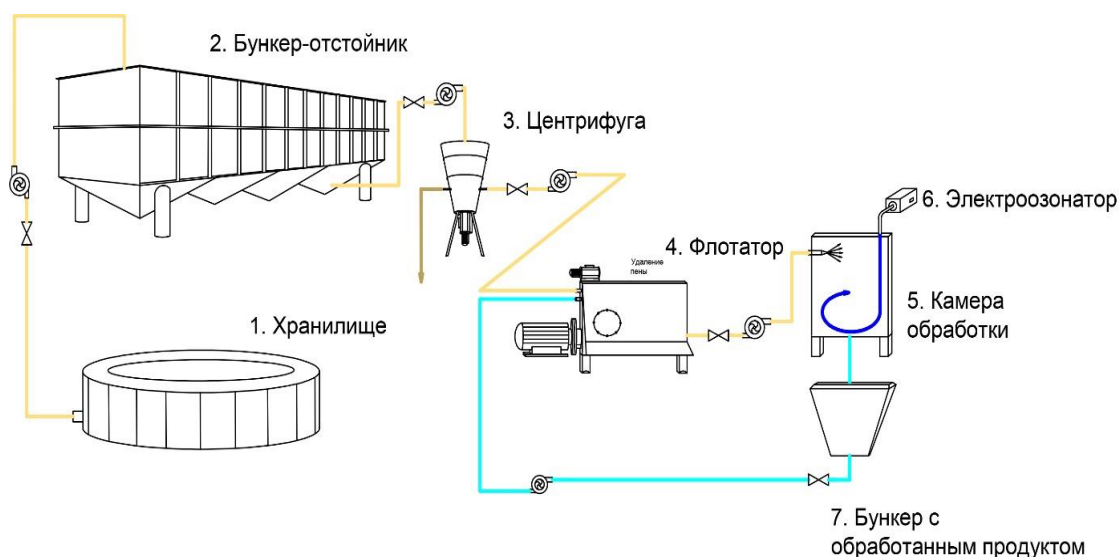


Рисунок 9 – Технологическая схема станции очистки навозных стоков

В результате экспериментальных исследований были получены данные влияния озонирования на санитарно-показательные бактерии. Навозные стоки обрабатывались четырьмя уровнями концентрации озона в подаваемой озоновоздушной 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). Анализ полученных результатов показывает, что нулевой порог выживаемости стафилококков достигается при любом из уровней концентрации озона, но при различных уровнях экспозиции (рисунок 10).

Определение влияния озона на колиформы осуществлялось по такой же методике, как и для стафилококков. Результаты исследований представлены в графической форме на рисунке 11.

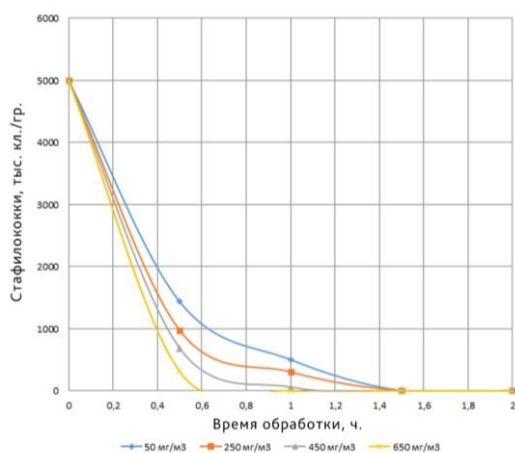


Рисунок 10 – График изменения выживаемости стафилококков от времени обработки при заданных концентрациях озона и температуре 12 °С

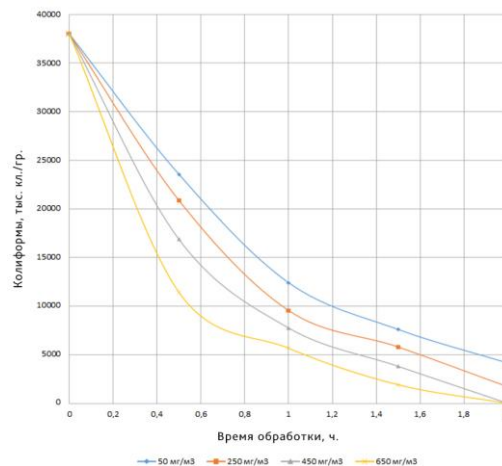


Рисунок 11 – График изменения выживаемости колиформ от времени обработки при заданных концентрациях озона и температуре 12 °С

Нами получены регрессионные модели для всех исследуемых уровней озоновоздушной 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 вредоносных микроорганизмов, так как при всех уровнях температуры нулевое содержание колиформ и стафилококков удавалось достичь при одних и тех же уровнях концентрации и экспозиции.

Выбор режимных параметров электроозонной обработки жидкой фракции навозных стоков осуществлялся по выживаемости ко-

лиформ, так как проведенные исследования показали, что выживаемость стафилококков при тех же режимах обработки значительно ниже.

Полное обеззараживание жидкой фракции навозных стоков достигается при времени экспозиции 2 часа в камере обработки с концентрацией озона 450 мг/м³.

В четвертой главе разработана система автоматизации установки для комплексной 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.

Разработана функциональная схема, которая позволяет визуализировать места установки узлов, формирующих сигналы и устройств, принимающих управляющее воздействие. Внешний вид разработанной функциональной схемы представлен на рисунке 11.

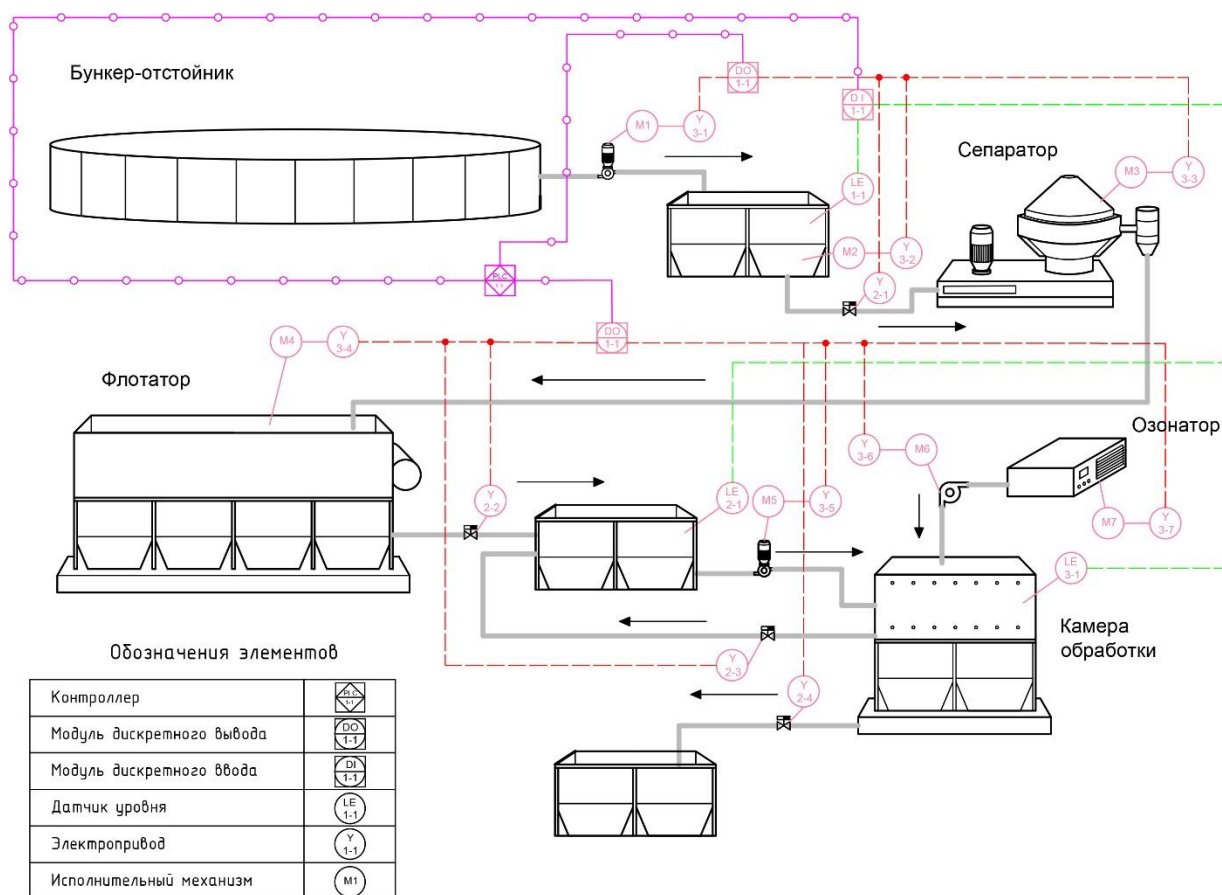


Рисунок 11 – Функциональная схема системы автоматизации станции очистки навозных стоков

Так же произведен расчет экономической эффективности применения комплексной технологии обеззараживания жидких 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.

Оценка эффективности применения станции очистки навозных стоков с использованием электроозонирования показала, что срок окупаемости проекта составляет 5 лет, а чистый дисконтированный доход составит 1936692 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 сократится за счет увеличения чистого дисконтированного дохода от продажи навоза в виде удобрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Определено, что емкость газоразрядного блока зависит от конструктивных 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 озонородушной 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 озонородушной 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 конструкционными 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 озонородушная смесь эффективно уничтожает патогенную микрофлору, содержащуюся в жидкой фракции навозных стоков. При этом дезинфицирующий эффект достигается при концентрации озона не менее 450 мг/м³ и времени взаимодействия жидкой фракции с озонородушной 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/м³ 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 № 2688610 «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 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.

Основные положения диссертации опубликованы

– в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Электроозонная технология очистки навозных стоков: реализация математической модели / Д. А. Нормов, **А. А. Азарян**, А.А. Цедяков, Д. С. Карлаков // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 74-82.

2. Оптимизация параметров электроозонной установки / Д. А. Нормов, Е. А. Федоренко, **А. А. Азарян** [и др.] // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 44-45.

3. Оптимизация параметров электроозонной установки / Д. А. Нормов, А. А. Шевченко, **А. А. Азарян** [и др.] // Сельский механизатор. – 2021. – № 10. – С. 26-29.

4. 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.

5. Реализация математической модели электроозонной очистки навоза / Д. А. Нормов, В. А. Драгин, **А. А. Азарян** [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 3. – С. 34-35.

– иные научные издания:

6. Азарян, А. А. Перспектива использования озонозооной смеси для очистки жидких навозных стоков / **А. А. Азарян** // Итоги научно-исследовательской работы за 2021 год : Материалы Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-

летию Кубанского ГАУ, Краснодар, 06 апреля 2022 года / Отв. за выпуск А.Г. Кощаев. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – С. 678-679.

7. Азарян, А. А. Установка для комплексной очистки жидкой фракции навозных стоков / **А. А. Азарян** // Итоги научно-исследовательской работы за 2021 год : Материалы Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ, Краснодар, 06 апреля 2022 года / Отв. за выпуск А.Г. Кощаев. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – С. 680-681.

8. 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. Кощаев. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. – С. 122.

9. Применение озона в агробιοтехнологии / Д. В. Пожидаев, П. П. Паршинцев, **А. А. Азарян**, А. А. Напольских // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко, Краснодар, 26–30 ноября 2016 года / Отв. за вып. А. Г. Кощаев. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – С. 1316-1317.

10. Нормов, Д. А. Электроозонная защита растений защищенного грунта от насекомых вредителей / Д. А. Нормов, **А. А. Азарян** // Актуальные вопросы экономики и технологического развития отраслей народного хозяйства: Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов, магистрантов и преподавателей, Краснодар, 23 апреля 2016 года / Составители: Дегтярев Г. В., Чернявская С. А., Дегтярева О. Г. – Краснодар: Издательство «Магарин Олег Григорьевич», 2016. – С. 234-238.

11. Азарян, А. А. Способы применения озона в птицеводстве / **А. А. Азарян**, С. В. Черных // Фундаментальные основы современных аграрных технологий и техники : Сборник трудов Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Юрга, 21-23 октября 2015 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Юрга: Национальный исследова-

тельский Томский политехнический университет, 2015. – С. 135-136.

Патент:

12. 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 / **Азарян А. А.**, Нормов Д. А., Нормова М. Д. [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

Подписано в печать «___» _____ 2026 г. Формат 60×84^{1/16}.
Бум. тип. № _____. Усл. печ. л. – _____.
Тираж 100 экз. Заказ № _____.