

На правах рукописи

ФИЛИМОНОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ
ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ СТОКОВ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Евграфов Алексей Владимирович**,
доктор технических наук, доцент, доцент
кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Бондарева Галина Ивановна**
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по инвестициям и
общим вопросам ФГБНУ «Федеральный
научный центр гидротехники и мелиорации
имени А.Н. Костякова»

Калиниченко Роман Владимирович
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
старший научный сотрудник отдела физики,
гидрологии и эрозии почв ФГНУ ФИЦ
«Почвенный институт им. В.В. Докучаева»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тверская государственная
сельскохозяйственная академия»

Защита состоится 25.09.2025 г. в 12:30 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. До настоящего времени недостаточно внимания уделялось вопросам сохранения и восстановления почвенного плодородия деградированных земель сельскохозяйственного значения в России.

Крупные животноводческие комплексы в состоянии повысить почвенное плодородие земель, используемых в сельскохозяйственном производстве за счет животноводческих стоков, которые являются побочными продуктами животноводства - ППЖ.

Подготовка ППЖ и утилизация их на сельскохозяйственных полях осуществляется на данный момент по различным технологиям. Наибольшее распространение получила технология утилизации, заключающаяся в накоплении стоков в лагунах, с последующим внесением на поля при помощи дождевальных машин или шланговых систем (ШС).

Внесение не подготовленных ППЖ наносит экологический вред окружающей среде и ухудшает качество выращиваемой продукции растениеводства и делает ее опасной для человека и сельскохозяйственных животных. Существующие технологии внесения животноводческих стоков нуждаются в совершенствовании их подготовки к утилизации на начальном этапе.

Цель работы: разработка технических средств для обработки животноводческих стоков электрическими полями с целью снижения их токсичности для последующей утилизации на полях возделывания сельскохозяйственной продукции.

Задачи:

- 1) анализ существующих технологий утилизации животноводческих стоков и их применением;
- 2) проведение экспериментальных исследований по воздействию электрических и магнитных полей на химический состав животноводческих стоков;
- 3) разработка технического средства на основе электролиза для снижения токсичности животноводческих стоков;
- 4) расчет ожидаемого эколого-экономического эффекта.

Объектом исследований являются стоки животноводческих комплексов.

Предметом исследования являются электрические поля, воздействие которых на сточные воды ферм изменяют их химический состав.

Научная новизна. Разработано техническое средство для детоксикации сточных вод животноводческих комплексов с помощью

воздействия на них электрических полей. Определены оптимальная его конструкция и режимы работы (заявка на патент № 2025106028). Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать требуемые концентрации азотных соединений в сточных водах, с учетом особенностей природно-климатических, почвенных условий сельскохозяйственных полей утилизации.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики расчета и математической модели, необходимых концентраций азотных соединений в сточных водах животноводческих комплексов, для последующей их утилизации на полях возделывания сельскохозяйственных растений, с предотвращением или минимизацией загрязнения окружающей среды.

Практическая значимость заключается в разработке установки для обработки стоков электрическими полями, которую можно применять непосредственно на предприятиях АПК для предотвращения негативного влияния побочных продуктов животноводства на экологическую ситуацию, использовать их для повышения почвенного плодородия и повышения качества и продуктивности продукции растениеводства и животноводства.

Методология и методы исследования. В исследованиях использованы теории вероятности и математической статистики. Использовалась современная методика обработки полученных данных.

Для оценки погрешности полученных экспериментальных данных использованы элементы теории вероятностей и математической статистики.

В процессе проведения эксперимента все опыты выполнялись в трёхкратной повторности, согласно методике опытного дела Доспехова Б. А.

Основные положения, выносимые на защиту:

- техническое средство для детоксикации сточных вод животноводческих комплексов с помощью воздействия на них электрических полей;
- результаты экспериментальных исследований по снижению концентрации аммонийных соединений, с помощью электрических полей, в стоках животноводческих комплексов;
- методика расчета и математическая модель для определения необходимых площадей сельскохозяйственных угодий с целью экологически безопасной утилизации сточных вод.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Положения диссертационной работы доложены на международных конференциях:

1. Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского», Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 25-26 января 2023 года.
2. XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development. Termez, Uzbekistan, 2025.
3. Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского», Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 22-23 января 2025 года.
4. Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 160-летию Тимирязевской академии, Москва, 2-4 июня 2025 года.
5. Межвузовский международный конгресс «Высшая школа: научные исследования», Москва, 11 июня 2025 год.

По материалам диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список используемых источников информации из 122 наименований и приложение на 2 страницах. Объем диссертации – 130 страниц, поясняется 32 таблицами и 42 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

В первой главе приведена классификация сточных вод АПК, их состав, образующийся объем, рисунок 1, в агропромышленном комплексе, и целесообразность утилизации на с/х полях.

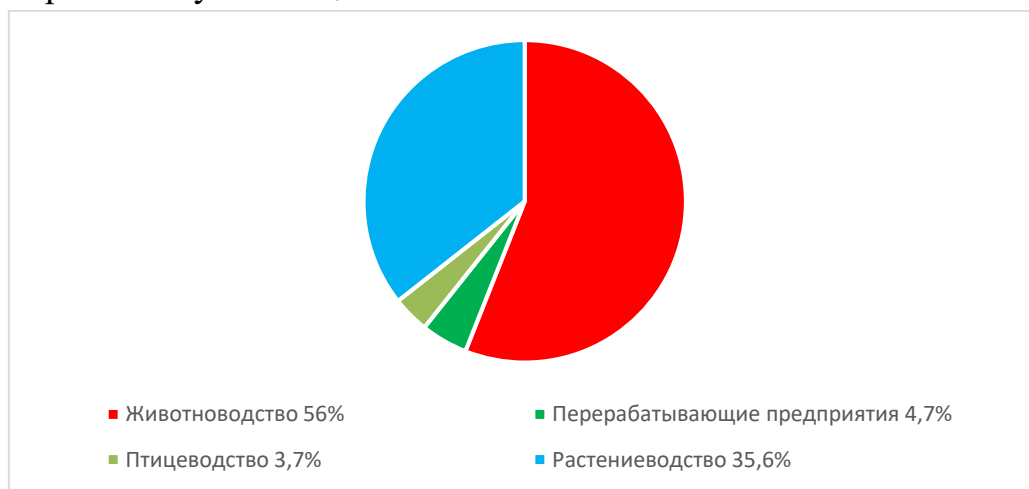


Рисунок 1 – Распределение отходов АПК по отраслям.

Следует отметить, что к животноводческим стокам, ППЖ, относится жидкая фракция, получаемая после разделения навоза на фракции. Для крупных хозяйств объем жидких стоков, составляет от 100 до 1500 куб. м³ в сутки. Сточные воды животноводческих стоков относятся к III классу опасности, умеренно опасные отходы, которые нарушают экологию, а восстановление занимает примерно 10 лет.

Сточные воды животноводческих комплексов в 1 м³ содержат 0,8...1,4 кг азота, 0,3...0,7 кг фосфора, 0,4...0,8 кг калия, причём 50...70 % азота находится в легкодоступной для растений форме и хорошо усваивается ими. Минеральная часть азота в стоках содержится в основном в виде аммония, нитратов по сравнению с ним мало, но при внесении в почву под действием нитрифицирующих бактерий аммоний трансформируется в нитраты, которые обладают большой подвижностью и не сорбируются почвой. Таким образом, в почвенном покрове сельскохозяйственных полей, на которых производится сельскохозяйственная продукция растениеводства, образуется избыток NO₃.

Во второй главе рассмотрена технология сбора ППЖ, с последующим хранением в специальных накопителях, лагунах или навозохранилищах для дезинфекции, а также существующие способы обработки животноводческих стоков для обеззараживания и снижения токсичности, такие как: термический – методом сушки; компостирование; анаэробные методы; химические; ультрафиолетовое облучение; электролиз.

Проведен анализ используемых методов внесения ППЖ в почву с/х полей по производству продукции растениеводства, а именно: орошение дождеванием; внутripочвенный полив; поверхностный полив по бороздам или полосам; распределение по полю с помощью систем жидкого внесения удобрений, в том числе ШС; внесение методом заправки с применением ШС, рисунок 2.

Методом внесения стоков животноводческих комплексов в почву сельскохозяйственных полей по производству продукции растениеводства, получившей наибольшее распространение, являются шланговые системы. По классификации транспортных систем ШС внесения побочных продуктов животноводства относится к гидравлическому трубопроводному транспорту и одна такая система позволяет вносить более 3 тыс. м³ ППЖ за смену.



Рисунок 2 – Принципиальная схема внесения стоков животноводческих комплексов в почву шланговой системой.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по воздействию электрических полей на изменение концентрации NH_4 в ППЖ. При проведении экспериментальных исследований в качестве заменителя сточных вод животноводческих комплексов использовался электролит на основе дистиллированной воды, в которую добавлялась аммиачная селитра, или нитрат аммония (NH_4NO_3), для имитации концентрации аммония, содержащегося в побочных продуктах животноводства. Для подбора материалов электродов для снижения концентрации аммонийных соединений в электролите использовались их сочетания по компоновочной схеме, представленной на рисунке 3.

Последовательность проведения экспериментальных исследований была следующей: в лабораторную установку № 1, рисунок 4, собранную для подбора электродов, загружался электролит, приготовленный на основе дистиллированной воды и аммиачной селитры с концентрацией NH_4 300 мг/дм³; далее в ней размещались электроды, через которые пропусклся постоянный электрический ток в течение 5 минут, следует отметить, что при испытании электродов не из одинакового материала поочередно изменялась их полярность; после окончания эксперимента определялось содержание веществ образовавшихся в процессе электролиза и конечная концентрация аммония в электролите.

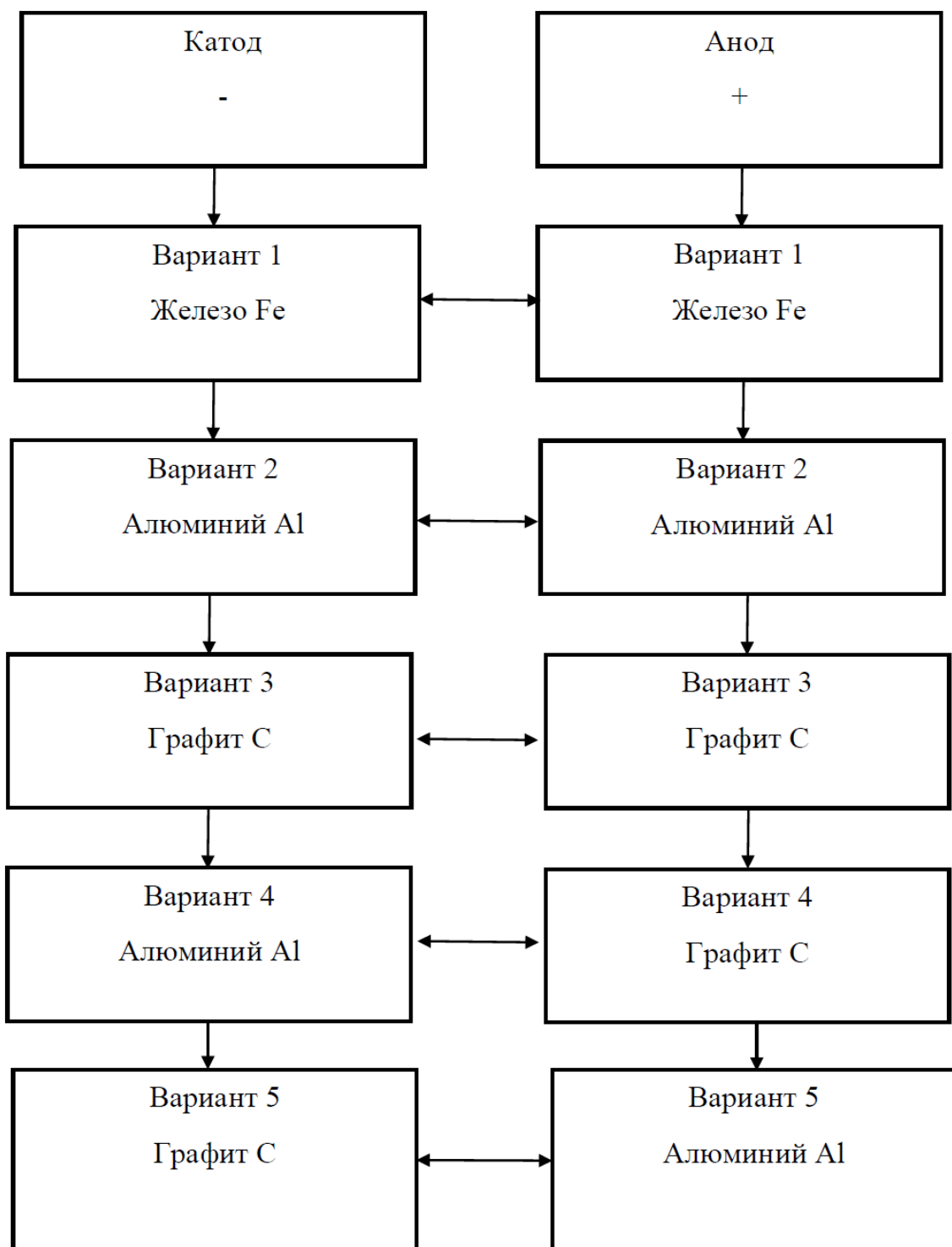


Рисунок 3 – Компонировочная схема подбора электродов.

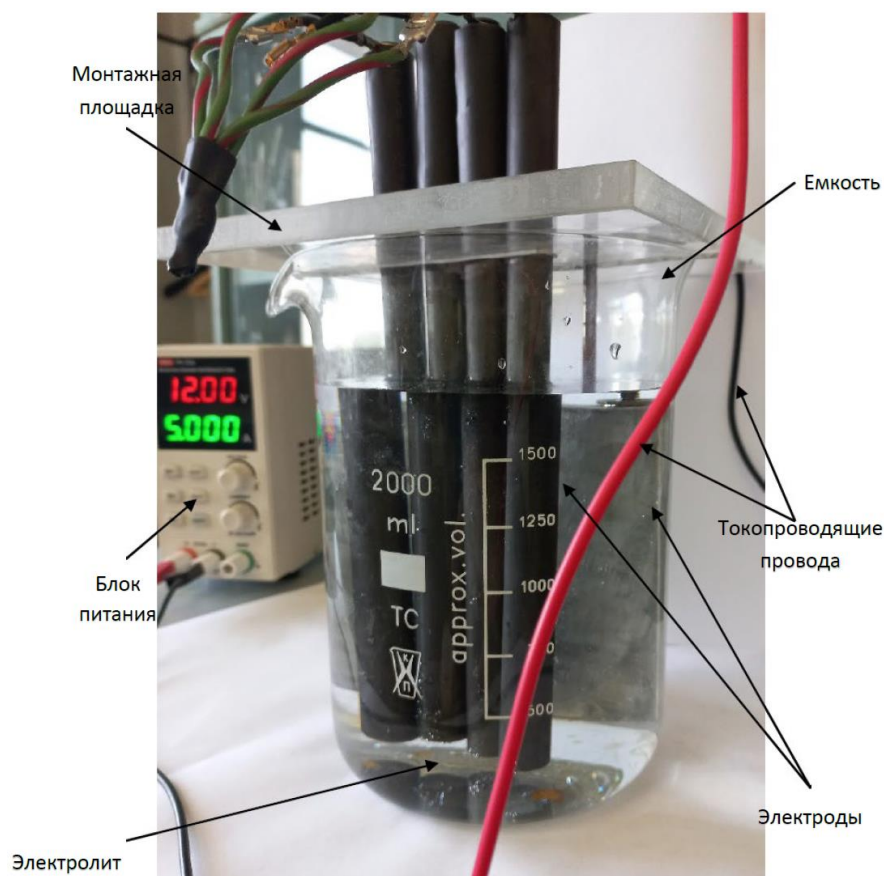


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки № 1, с графитовым и алюминиевым электродами.

По итогам исследований был выбран вариант 4, согласно схеме проведения экспериментальных исследований, рисунок 3, использовалась схема катод Al анод C, в результате снижение концентрации аммония в электролите составили 50 % от начальной, таблица 1.

Таблица 1 – Результаты снижения концентрации аммония в электролите при проведении экспериментальных исследований в установке № 1.

№ п/п	Вариант проведения эксперимента	Концентрация начальная NH_4 мг/л	pH начальная	Конечная концентрация NH_4 мг/л	Конечная pH
1	Вариант 1	300	5,53	245	7,25
2	Вариант 2	300	5,53	148	8,23
3	Вариант 3	300	5,78	254	8.86
4	Вариант 4	300	5,89	153	8.88
5	Вариант 5	300	5,53	258	7,25

*Примечание: время обработки 60 секунд

Далее для подбора конфигурации электродов была сконструирована статическая лабораторная установка № 2, рисунок 5. Схема подключения показана рисунке 6. Данная установка, в варианте № 2, представляет собой колонну, в которой катод выполнен из алюминиевой трубы (сплав АД31Т1) с внутренним диаметром 46 мм, анод – из графита с внешним диаметром 16 мм, рисунок 5, где внешняя токоизоляция состоит из двух слоев термоусадочных рукавов марки Ф70 с максимальной нагрузкой каждого слоя 10 кВ. Эксперимент проводился при значениях постоянного тока 5А 12 Вольт.



Рисунок 5 – Лабораторная установка № 2

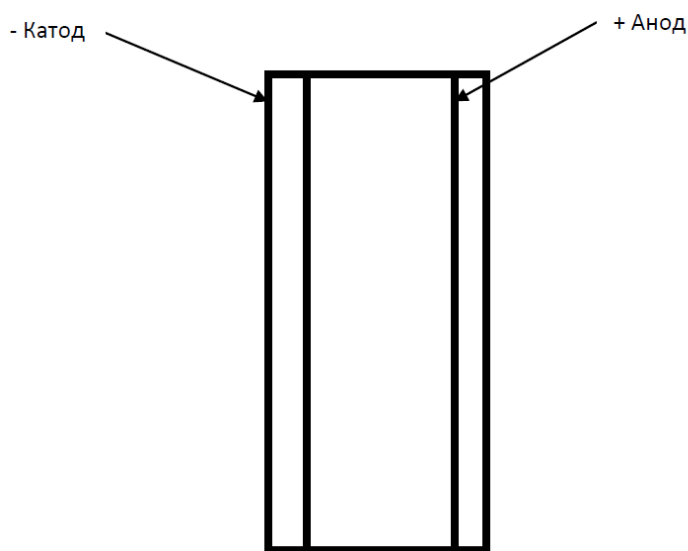


Рисунок 6 – Схема подключения статической лабораторной установки № 2

Из результатов проведения экспериментальных исследований, рисунок 7, можно сделать вывод, что вариант обработки электролита электрическими полями в статической установке № 2 по варианту 4, алюминиевый катод и графитовый анод, эффективно снижает содержание аммония в растворе. При обработке раствора аммония электрическими полями в прикатодном слое его концентрация $K1$ быстро уменьшается, при этом NH_4 не успевает поступать диффузионным путем из основного объема электролита, концентрация в котором составляет $K2$, то есть существует неравенство:

$$K1 < K2 \quad (1)$$

Поэтому эффективность процесса электролиза в неподвижной среде электролита ограничена скоростью диффузии между раствором при электродном пространстве и основным слоем электролита.

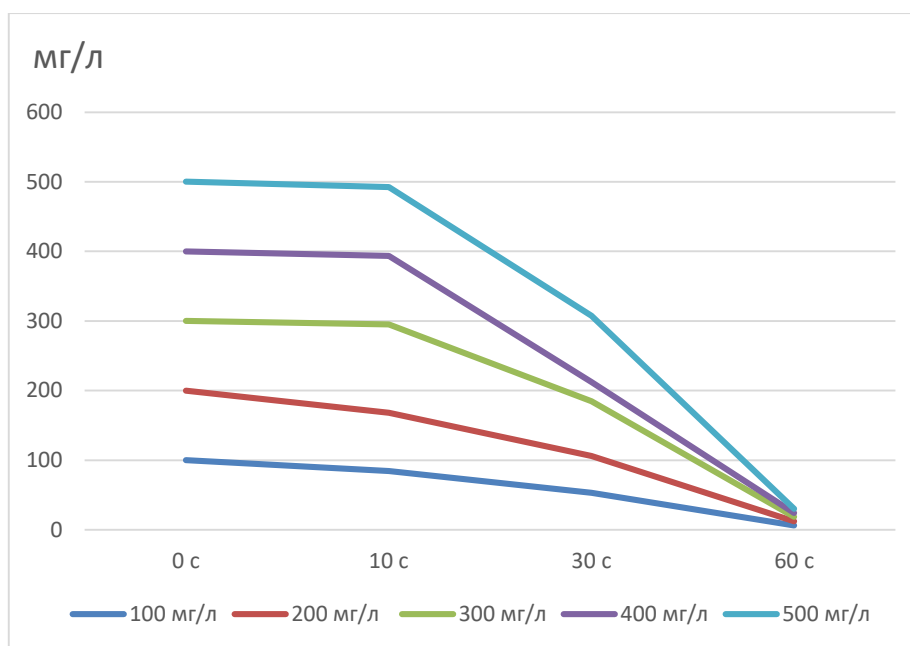


Рисунок 7 – Изменение концентрации NH_4 электролита, в статической электролизной установке, по варианту проведения эксперимента № 4, от времени обработки раствора электрическими полями.

Для создания прототипа промышленной установки для детоксикации сточных вод животноводческих комплексов и повышения эффективности электролиза катиона аммония был разработан, реализован и испытан лабораторный прототип динамической электролизной установки №3Д, по варианту 4 с графитовым анодом и алюминиевым катодом цилиндрической формы, схема которой представлен на рисунке 8. Расход потока составлял 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5 л/сек, длина рабочей части в процессе проведения исследований изменялась и составляла соответственно 0,5 м, 1 м и 1,5 м. После завершения эксперимента определялись концентрация азотных соединений и водородный показатель pH электролита. Начальные концентрации аммония в электролите, как и в предыдущем лабораторном исследовании, составили 100, 200, 300, 400 и 500 мг/л.

Геометрические параметры рабочих частей динамической электролизной установки были такие же, как и у статической.

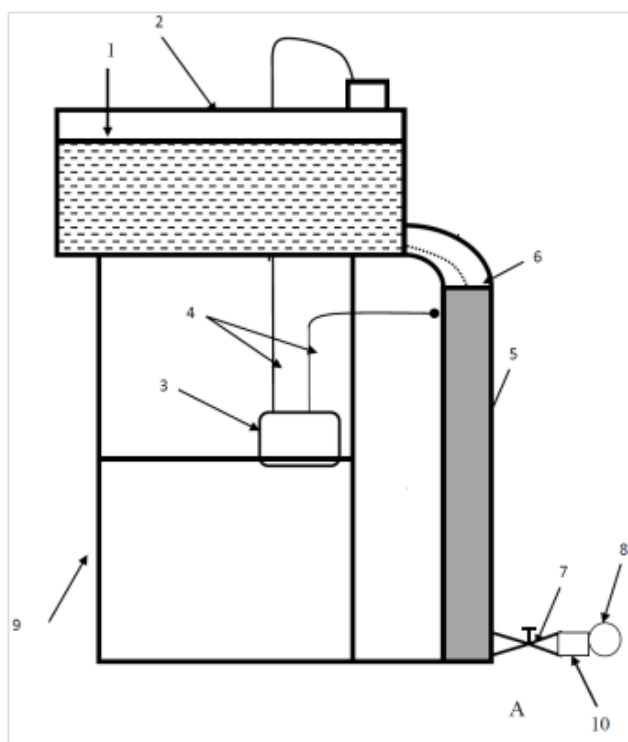


Рисунок 8 – Схема лабораторной динамической электролизной установки № 3Д, где; 1 – уровень электролита, 2 – бак, 3 – источник постоянного тока, 4 – токоведущие провода, 5 – рабочая часть (электролизер), 6 – гибкий шланг, 7 – кран, 8 – расходомер, 9 – монтажная рама, 10 – сбросной шланг.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблицах 2, 3, 4, из которых видно, что эффективность работы динамической электролизной установки возрастает при увеличении рабочей части электролизера и уменьшении скорости электролита в живом сечении потока.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований изменения концентрации аммонийных соединений в динамической лабораторной установке, при начальной концентрации NH_4 300 мг/л.

№	K_n , начальная концентрация NH_4 , мг/л	$Q_{\text{сек}}$, расход, л/с	$Q_{\text{сут}}$, расход, м ³ /сут	V , скорость, м/с	t , время обработки, с	K_k , конечная концентрация NH_4 , мг/л
l_p , длина рабочей части электролизера, 0,5 м						
1	300	0,1	8,64	0,07	8	260
2	300	0,2	17,28	0,13	4	280
3	300	0,3	25,92	0,2	3	275
l_p , длина рабочей части электролизера, 1 м						
4	300	0,1	8,64	0,07	15	225
5	300	0,2	17,28	0,13	8	260
6	300	0,3	25,92	0,2	5	275
l_p , длина рабочей части электролизера, 1,5 м						
7	300	0,1	8,64	0,07	23	185
8	300	0,2	17,28	0,13	12	240
9	300	0,3	25,92	0,2	8	260

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований изменения концентрации аммонийных соединений в динамической лабораторной установке, при начальной концентрации NH_4 400 мг/л.

№	К _н , начальная концентрация NH_4 , мг/л	Q _{сек} , расход, л/с	Q _{сут} , расход, м ³ /сут	V, скорость, м/с	t, время обработки, с	К _к , конечная концентрация NH_4 , мг/л
I _р , длина рабочей части электролизера, 0,5 м						
1	400	0,1	8,64	0,07	8	352
2	400	0,2	17,28	0,13	4	376
3	400	0,3	25,92	0,2	3	382
I _р , длина рабочей части электролизера, 1 м						
4	400	0,1	8,64	0,07	15	310
5	400	0,2	17,28	0,13	8	352
6	400	0,3	25,92	0,2	5	370
I _р , длина рабочей части электролизера, 1,5 м						
7	400	0,1	8,64	0,07	23	262
8	400	0,2	17,28	0,13	12	328
9	400	0,3	25,92	0,2	8	352

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований изменения концентрации аммонийных соединений в динамической лабораторной установке, при начальной концентрации NH_4 500 мг/л.

№	К _н , начальная концентрация NH_4 , мг/л	Q _{сек} , расход, л/с	Q _{сут} , расход, м ³ /сут	V, скорость, м/с	t, время обработки, с	К _к , конечная концентрация NH_4 , мг/л
I _р , длина рабочей части электролизера, 0,5 м						
1	500	0,1	8,64	0,07	8	444
2	500	0,2	17,28	0,13	4	472
3	500	0,3	25,92	0,2	3	479
I _р , длина рабочей части электролизера, 1 м						
4	500	0,1	8,64	0,07	15	395
5	500	0,2	17,28	0,13	8	444
6	500	0,3	25,92	0,2	5	465
I _р , длина рабочей части электролизера, 1,5 м						
7	500	0,1	8,64	0,07	23	339
8	500	0,2	17,28	0,13	12	416
9	500	0,3	25,92	0,2	8	444

В четвертой главе представлены математическая модель и утилизационная способность с/х полей на примере сельхозпредприятия «Бежецк – Агро», свиноводческий комплекс на 12 тыс. голов, расположенного в Тверской области. Одним фактором расхода азотных соединений из почв являются возделываемые культуры, которые обеспечивают их вынос с сельскохозяйственных полей. Урожайность растениеводческой продукции определяется агрономической службой хозяйства и зависит от природно-климатических условий и характеристик почвы.

Следующим фактором, влияющим на дозы внесения азота, является поглотительная способность почвы или почвенно-поглощающий комплекс (ППК), который сорбирует соединения NH_4 , и по мере уменьшения его концентрации в почвенном растворе, за счет потребления сельскохозяйственными культурами, отдает обратно.

Количество почвы, реагирующей с аммонийным азотом животноводческих стоков, можно определить по зависимости:

$$M_{rp} = \rho \cdot n \cdot S, \text{ кг} \quad (2)$$

где: ρ – объемная плотность почвы кг/м^3 ; n – мощность пахотного горизонта м; S – площадь м^2 .

Поглощающую емкость почвенного слоя к иону NH_4 можно определить по следующему уравнению:

$$K_p = M_{rp} \cdot S_{ппк}, \text{ кг} \quad (3)$$

где: $S_{ппк}$ – сорбционная емкость ППК почвы к иону NH_4 , $\text{мг} \cdot 1 \text{ кг}$.

Наиболее востребованной технологией внесения животноводческих стоков являются шланговые системы, рисунок 2, которую можно разделить на три способа, рисунок 9:

1) способ заправки в почвенный слой или пахотный горизонт; 2) способ поверхностного внесения; 3) заправка в подпочвенный слой или подпахотный горизонт.

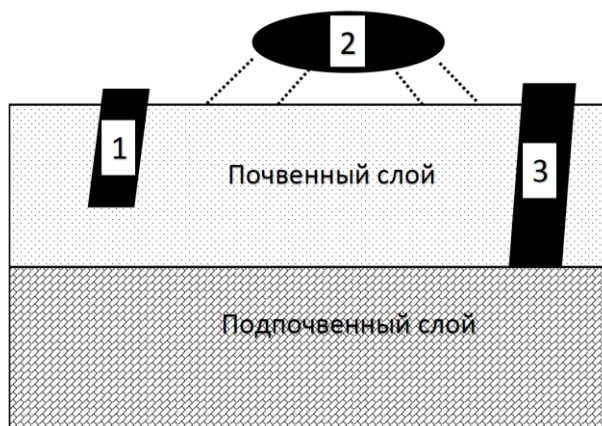


Рисунок 9 – Способы шлангового внесения стоков животноводческих комплексов: 1) способ заправки в почвенный слой; 2) способ поверхностного внесения; 3) заправка в подпочвенный слой.

На утилизационную способность почвы сельскохозяйственных полей также влияет ее пористость, даже при ее высокой влажности, при поверхностном внесении животноводческих стоков, способ 3, происходит следующий процесс, рисунок 10. Стоки, попадая на почвенную поверхность инфильтруются и вытесняя почвенный раствор, заполняют поры, тем самым обеспечивая ППК аммонием, который им сорбируется.

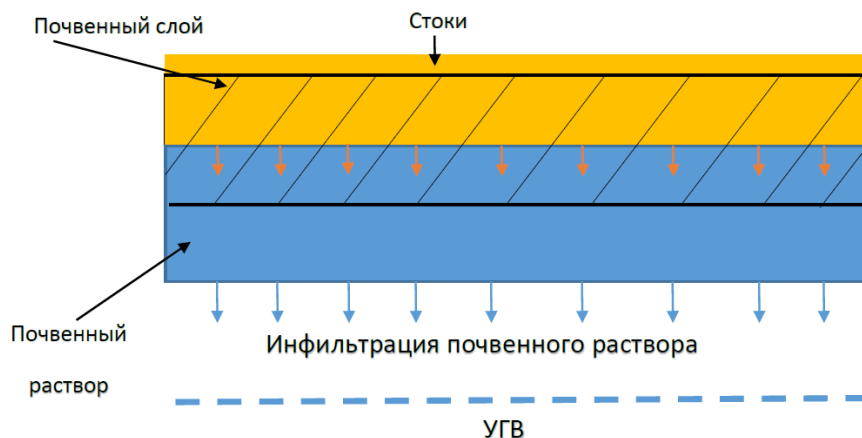


Рисунок 10 – Вытеснение сточными водами, при поверхностном внесении, почвенного раствора из порового пространства слоя почвы.

Объем стоков, который может разово вместить почвенный слой сельскохозяйственного поля, определяется по зависимости:

$$Вп = \frac{Vп \cdot Пп}{100}, м^3 \quad (4)$$

где: $Vп$ – объем расчетного почвенного слоя, $м^3$; $Пп$ – пористость расчетного почвенного слоя, %.

Вынос азота с урожаем считается по чистому веществу, в 1 кг NH_4 содержится 77,65 % N или 0,7765 кг, что следует учитывать при расчетах.

Почвы хозяйства дерново-подзолистые, мощность 25 см, объемная плотность 1,2 г/ $м^3$, поглощающая емкость по NH_4 составляет 0,8 мэкв, пористость 50 %, данные предоставлены агрономической службой хозяйства.

На свиноводческом комплексе, сельхозпредприятия «Бежецк-Агро» по проекту предполагается самосплавная система навозоудаления, а также строительство 4 пленочных открытых лагун емкостью 10000 $м^3$ каждая, под жидкую фракцию навоза после разделения его методом сепарации, и 2 карантинные.

Расчет, таблица 5, представлен для внесения шланговой системой по следующим вариантам: 1 вариант запашка животноводческих стоков на глубину 15 см, вариант 3 поверхностным способом, рисунок 9.

Таблица 5 – Сорбционная характеристика ППК почвы 1 га сельскохозяйственных угодий компании «Бежецк-Агро».

№	Вариант внесения стоков	Количество реагирующей почвы Мрп, кг на га	Поглощающая емкость почвы к NH_4 Кп, кг на га	Поглощающая емкость почвы Кпа по чистому N, кг на га	Разовый максимальный объем стоков, размещаемый в почве Вп, м ³ на га	Количество NH_4 в кг на 1 м ³ стоков	Количество чистого N в кг на 1 м ³	Количество NH_4 в кг на га	Количество N в кг на га
Концентрация NH_4 в стоках 500 мг/л, N 390 мг/л									
1	1	1200000	43,2	33,55	500	0,5	0,39	250	195
2	2	3000000	108	83,86	1250	-"-	-"-	625	487,5
Концентрация NH_4 в стоках 400 мг/л, N 310,6 мг/л									
3	1	1200000	43,2	33,55	500	0,4	0,31	200	155
4	2	3000000	108	83,86	1250	-"-	-"-	500	387,5
Концентрация NH_4 в стоках 300 мг/л, N 233 мг/л									
5	1	1200000	43,2	33,55	500	0,3	0,23	150	115
6	2	3000000	108	83,86	1250	-"-	-"-	375	287,5
Концентрация NH_4 в стоках 200 мг/л, N 155,3 мг/л									
7	1	1200000	43,2	33,55	500	0,2	0,16	100	80
8	2	3000000	108	83,86	1250	-"-	-"-	250	200
Концентрация NH_4 в стоках 100 мг/л, N 77,7 мг/л									
9	1	1200000	43,2	33,55	500	0,1	0,08	50	40
10	2	3000000	108	83,86	1250	-"-	-"-	125	100
Концентрация NH_4 в стоках 50 мг/л, N 38,9 мг/л									
11	1	1200000	43,2	33,55	500	0,05	0,04	25	20
12	2	3000000	108	83,86	1250	-"-	-"-	62,5	50

Утилизационную способность почвы определяется по зависимости:

$$K_{ам} = \frac{K_{п} \cdot 1000}{B_{п}}, \text{ мг/л} \quad (5)$$

где: - $K_{ам}$ концентрация NH_4 в стоках животноводческих комплексов мг/л.

Данное уравнение позволяет определить допустимую концентрацию NH_4 в стоках животноводческого комплекса, подлежащих утилизации, исходя из конкретных физико-химических свойств почв, для их экологически безопасной утилизации.

Были произведены расчеты, с использованием разработанной математической модели, по нескольким сценариям: 1) 1 вариант внесения с заашкой в почвенный слой на глубину 0,15 м, без обработки стоков свиноводческих комплексов электрически полями; 1.1 – внесение продуктов ППЖ в почву по первому варианту, с использованием электролизной установки; 2) Распределение стоков комплекса, второй вариант внесения по поверхности почвы сельскохозяйственных полей, без их обработки электрическими полями; 2.1 – внесение сточных вод по технологии второго варианта внесения, с применением электролизной установки.

Изначально сточные воды могут содержать в себе до 500 мг/л NH_4 , в процессе хранения в лагуне происходят потери азота с ее поверхности в виде аммиака, которые по литературным данным могут достигать 33 %. Таким образом, при расчетах, к моменту внесения ППЖ концентрация аммония в них принята 300 мг/л, без обработки электрическими полями. При использовании электролизной установки начальное содержание аммония также задавалось 300 мг/л.

В результате расчетов были определены следующие площади сельскохозяйственных полей из условия предотвращения или минимизации загрязнения окружающей среды соединениями аммония, и экологически безопасные концентрации NH_4 в сточных водах животноводческого комплекса, которые должна обеспечить разработанная динамическая электролизная установка:

- При 1 сценарии, внесение методом заашки на глубину 0,15 м, необходимая площадь полей утилизации составит 280 га, при содержании NH_4 в стоках 300 мг/л;

- Сценарий 1.1 предусматривает использование разработанной динамической электролизной установки, экологически безопасная концентрация аммония в сточных водах, по результатам проведенных расчетов 85 мг/л, требуемая площадь сельскохозяйственных угодий 80 га;

- Сценарий 2, внесение поверхностным способом, без обработки электрическими полями, при концентрации NH_4 в стоках 300 мг/л, требуемая площадь сельскохозяйственных полей составит 112 га;

- Сценарий 2.1, поверхностное распределение животноводческих стоков с применением электролизной динамической установки при концентрации вносимых ППЖ 85 мг/л по аммонийному азоту, площадь полей утилизации составляет 32 га.

Эффективность работы динамической электролизной установки с одной сотой, в зависимости от расхода и размера рабочей части представлены в таблице 2. Исходя из полученных экспериментальным путем данных, применительно к проектируемому свиноводческому комплексу, были выбраны следующие параметры: l_p , длина рабочей части электролизера, 1,5 м; $Q_{сек}$, расход, 0,1 л/с; $Q_{сут}$, расход, 8,64 м³/сут.; V , скорость, 0,07 м/с; t , время обработки, 23 с; K_n , начальная концентрация NH_4 , 300 мг/л; K_k , конечная концентрация NH_4 , 185 мг/л, по N 143,65 мг/л.

Для снижения концентрации аммония в сточных водах с 300 мг/л до 85 мг/л при круглогодичной работе динамической электролизной установки, для 40000 м³ ППЖ, понадобится 13 сот, что потребует необходимую площадь полей утилизации, при сценарии 1.1, 80 га против 280 га, при содержании NH_4 300 мг/л, и 32 га против 112 га при концентрации аммония также 300 мг/л, по сценарию 2.1 внесения сточных вод проектируемого свиноводческого комплекса компании «Бежецк-Агро».

Принципиальная схема промышленной динамической электролизной установки для детоксикации сточных вод животноводческих комплексов представлена на рисунке 11. Данная конструкция размещается на поверхности лагуны, что позволяет не встраивать соты в подающие магистрали, и не изменять конструкцию подачи стоков, а также обеспечивает ее мобильность и облегчает техническое обслуживание и ремонт. Количество сот, размещаемых на понтоне, зависит от конкретных характеристик лагуны, и требуемых значений концентрации аммонийных соединений в стоках, исходя из обеспечения их экологически безопасной утилизации.

Следует отметить, что при хранении стоков в лагунах с их поверхности испаряется большое количество аммиака, который загрязняет атмосферу, и собрать его на открытом пространстве невозможно. Разработанное техническое устройство позволяет сконцентрировать NH_3 в конкретном месте и отобрать его с помощью скрубберов, минимизировать загрязнения воздушного пространства в месте размещения лагун.

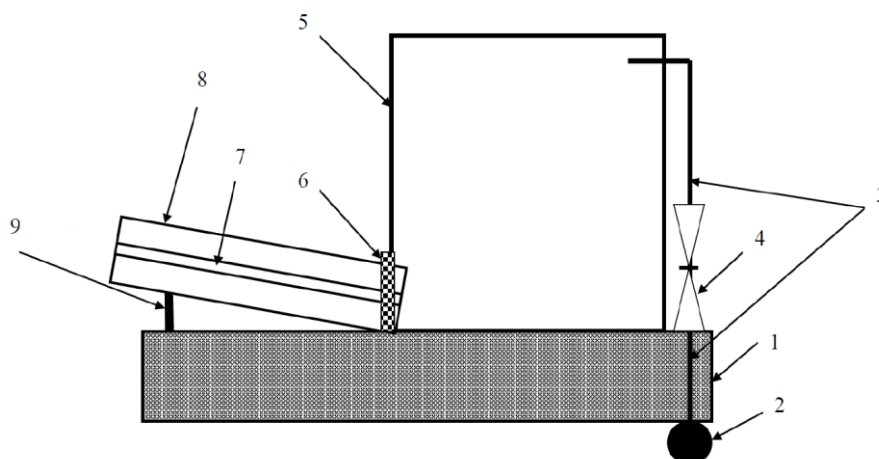


Рисунок 11 – Принципиальная схема динамической электролизной установки: 1 – понтон; 2 – насосная установка; 3 – напорная линия; 4 – шиберная задвижка; 5 – открытая компенсационная емкость; 6 – эластичная соединительная муфта; 7 – графитовый анод; 8 – катод из алюминия; 9 – регулируемая опора.

Пятая глава посвящена расчету экономической эффективности утилизации сточных вод животноводческих комплексов. Из анализа таблиц 6, 7, 8 можно сделать вывод, что сценарии 1.1 и 2.1 экономически выгодны, так как экономия эксплуатационных затрат по сценарию 1.1 составила 232376,37 руб., по сравнению со сценарием 1, а экономия эксплуатационных затрат по сценарию 2.1 – 27495,33 руб. по сравнению со сценарием 2.

Таблица 6 – Результаты расчёта годовой экономии от снижения эксплуатационных затрат.

Варианты сценариев	Затраты, руб.	Экономия, в руб.
Сценарий 1	397880	-
Сценарий 1.1	165503,63	232376,37
Сценарий 2	111274,8	-
Сценарий 2.1	83779,47	27495,33

* Примечание: приведенные затраты по сценариям 1.1, 2.1 являются суммами затрат на дизельное топливо и электроэнергию при электролизе

По данным Росстата, в конце 2024 года в РФ численность поголовья свиней составляло 29 млн голов. Существующие методы утилизации животноводческих стоков до конца не устраняют негативное воздействие сточных вод животноводческих комплексов на окружающую среду.

В юридической практике был прецедент в Московской области в Луховицком районе зафиксирован факт загрязнения сточными водами свиноводческого комплекса притока реки Меча.

Помимо массовой гибели рыбы, ущерб нанесен другим водным биологическим ресурсам и среде их обитания, а именно: кормовой базе, включая фито зоопланктон, макробентосу (моллюски) и мягкому бентосу. Сумма ущерба составила 9,3 млн руб. Юридическое лицо должно провести рекультивацию и очистку водного объекта притока реки Меча на площади 18000 м².

По расценкам рекультивации и очистки водных объектов от загрязнения стоимость комплексной очистки 200 м² стоит 350 тыс. рублей, стоимость компенсации за причинённый ущерб приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Затраты на возмещения экологического ущерба нанесенного свинокомплексом от сброса жидких навозных стоков в реку Меча

Судебные взыскания, млн руб.	Площадь зараженной реки, м ²	Стоимость рекультивации одного уч. 200 м ² , руб.	Стоимость всей рекультивации в млн руб.	Понесенные убытки свинокомплексом, млн руб.
9,3	18000	350000	31,5	40,8

Таким образом можно сделать заключение, что применение разработанной динамической электролизной установки позволяет предотвратить ущерб окружающей среде, и значительно снизить экономические и материальные затраты на утилизацию сточных вод животноводческих комплексов.

Таблица 8 – Оценка экономических затрат по внесению животноводческих стоков шланговыми системами при разных сценариях

№ п/п	Концентрация NH_4 в стоках, мг/л	Площадь внесения, га	Производительность трактора $W_{\text{ч}}$, га/ч	Производительность трактора за смену $W_{\text{с}}$ га/смен	Кол-во смен	Усилие на крюк трактора, кН/м ²	Крюковая нагрузка $P_{\text{кр}}$, кВт	Крюковой расход топлива $g_{\text{кр}}$, кг кВт/ч	Скорость движения трактора с орудием, м/с	Кол-во затрачиваемого топлива, л.	Затраты на топливо в руб.	Затраты на работу электроли за стоков, руб. в год.
1	Сценарий №1											
2	300	280	1,78	14,24	19,6	22,34	27,3	0,679	1,38	5684	397880	-
3	Сценарий №1.1											
4	300	80	1,78	14,24	5,6	22,34	27,3	0,679	1,38	1624	113680	51823,63
5	Сценарий № 2											
6	300	112	1,78	14,24	7,8	0	19,1	0,270	1,38	1589,64	111274,8	-
7	Сценарий № 2.1											
8	85	32	1,78	14,24	2,24	0	19,1	0,270	1,38	456,512	31955,84	51823,63

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих технологий обеззараживания и детоксикации животноводческих стоков показал, что среди них наиболее эффективным и применяемым является обработки побочных продуктов животноводства химическими реагентами, такими как формальдегиды и хлорсодержащие вещества. Недостатком данного способа является то, что в стоках остаются реагенты, которые необходимо удалять, и в своем начальном виде полученный продукт опасен для дальнейшей утилизации. Способ обработки сточных вод животноводческих комплексов электрическими полями дает двойной эффект, позволяет снизить концентрацию в них соединений NH_4 и уничтожить болезнетворные микроорганизмы, при этом токсичность сточных вод снижается, и не требуется дополнительной их очистки.

2. Экспериментальные исследования показали, что наиболее оптимальным является использование следующего сочетания материалов в установке для электролиза, анод – из графита, катод – из алюминия, при этом на эффективность электролиза NH_4 влияние оказывает катод. Наибольший эффект, по снижению концентрации аммония в электролите достигается при его движении в динамической электролизной установке, в отличие от статической. Эффективность процесса электролиза в неподвижной среде электролита ограничена скоростью диффузии между раствором в приэлектродном пространстве и основным слоем электролита. При движении электролита происходит перемешивание раствора, и производительность электрохимического процесса возрастает.

4. Разработанная динамическая электролизная установка позволяет снизить концентрацию аммония в стоках животноводческих комплексов до требуемых значений, которые определяются по физико-химическим свойствам почвы конкретного хозяйства, что обеспечивает их экологически безопасную утилизацию, с предотвращением ущерба окружающей среде.

Для снижения концентрации аммония в сточных водах с 300 мг/л до требуемых 85 мг/л, для почв хозяйства компании «Агро-Бежецк», при круглогодичной работе динамической электролизной установки, и объеме 40000 м³ ППЖ, понадобится 13 сот. Необходимая площадь полей утилизации, составит 32 га против 112 га.

5. Применение разработанного технического устройства для электролиза сточных вод животноводческих комплексов, позволяет значительно снизить экономические и материальные затраты на их утилизацию, и предотвратить экологический ущерб окружающей среде. В результате расчета экономия эксплуатационных затрат по предлагаемой технологии составила 232376,37 руб. Предотвращение экологического ущерба окружающей среде может составить более 40 млн руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Дидманидзе, О. Н. Результаты экспериментальных исследований влияния электрических полей на содержание аммония в животноводческих стоках / О. Н. Дидманидзе, А. В. Евграфов, Н. Н. Пуляев, Д. А. Филимонов // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 4-9. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-5-4-9.
2. Дидманидзе, О. Н. Динамическая электролизная установка для снижения токсичности животноводческих стоков / О. Н. Дидманидзе, А. В. Евграфов, А. С. Гузалов, Д. А. Филимонов // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 6 (336). – С. 36-37. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-6-2-7.

Публикации в международных базах данных

3. Evgrafov, A. Experimental studies on the effect of electric field on ammonium nitrogen compounds in livestock wastewater / A. Evgrafov, D. Filimonov, N. Perevozchikova // E3S Web of Conferences : XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Termez, Uzbekistan, 31 октября 2024 года. – Termez, Uzbekistan: EDP Sciences, 2025. – P. 5009. – DOI 10.1051/e3sconf/202561305009.
4. Didmanidze, O. Experimental Simulation Setup for Reducing the Concentration of Nitrogen Compounds in Livestock Farm Effluents / O. Didmanidze, A. Evgrafov, N. Pulyaev, A. Guzalov, D. Filimonov A. Kurylenko et al. // Ann Civ Eng Manag. – 2025. – No. 2 (1), Pp. 01-09.

Публикации в других рецензируемых научных журналах

5. Дидманидзе, О. Н. Методика обеспечения экологически безопасной утилизации животноводческих стоков на сельскохозяйственных полях орошения / О. Н. Дидманидзе, А. В. Евграфов, Н. Н. Пуляев [и др.]. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2024. – 164 с. – ISBN 978-5-00227-323-2.
6. Дидманидзе, О. Н. Детоксикация животноводческих стоков электрическими полями / О. Н. Дидманидзе, А. В. Евграфов, Д. А. Филимонов // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22-23 января 2025 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 65-71.