

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права

УДК 621.35:628.3

БОЙКО
Михаил Анатольевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАРУЖНОЙ МОЙКИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве (технические науки)

Минск, 2026

Научная работа выполнена на кафедре электроснабжения и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Научный
руководитель

КРУТОВ Анатолий Викторович, доцент кафедры электроснабжения и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», кандидат технических наук, доцент

Официальные
оппоненты:

ЗЯЦ Евгений Михайлович, профессор кафедры энергетики учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», доктор технических наук, профессор;

ПАШИНСКИЙ Василий Антонович, профессор кафедры энергоэффективных технологий учреждения образования «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ», кандидат технических наук, доцент

Оппонирующая
организация

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится «31» марта 2026 года в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций К 05.31.01 при учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (БГАТУ) по адресу: г. Минск, пр. Независимости, 99, корп. 1, ауд. 317.

Почтовый адрес: пр. Независимости, 99, корп. 1, Минск, 220012. Телефон ученого секретаря (+37517) 326-04-25; адрес электронной почты: prot.aef@bsatu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГАТУ.

Автореферат разослан «27» февраля 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



И. В. Протосовицкий

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации, после выполнения сезонных работ, а также при постановке на хранение тракторы, грузовые автомобили, комбайны, сельскохозяйственные машины (далее сельскохозяйственная техника) периодически подвергается наружной мойке. В результате этого образующиеся сточные воды содержат в своем составе механические примеси, протекшие горюче-смазочные материалы, рабочие жидкости, синтетические моющие средства, используемые при мойке, и другие загрязнения. Сточные воды, содержащие перечисленные вещества, представляют большую угрозу для окружающей среды и являются источником загрязнения почвы и гидросферы. Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, по состоянию на 2025 год по стране сброс сточных вод в поверхностные водные объекты с превышением нормативов допустимых концентраций загрязнений составляет 3,7 млн. м³. В их числе сточные воды сельскохозяйственных организаций, которых на начало 2025 года в стране насчитывалось более чем 1,4 тысячи. В соответствии с национальной стратегией устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь индекс сброса недостаточно очищенных сточных вод в водные объекты к 2030 году должен стремиться к нулю.

В данном диссертационном исследовании рассмотрены существующие технологии очистки сточных вод, анализ которых показывает, что они позволяют устранить до 75 % – 95 % загрязнений. Предложено усовершенствовать применяемые в технологиях очистки электрохимические методы, так как они наиболее полно соответствуют требованиям экологичности и позволяют повысить эффективность очистки сточных вод при сравнительно небольших затратах электроэнергии. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования электротехнологического способа очистки с применением электрохимической коагуляции и электромагнитной флотации. Результаты исследования показали, что предложенная схема очистки с применением разработанной установки, позволяет очищенную сточную воду по показателям качества, установленным в Строительных нормах Республики Беларусь (СН 3.02.03-2019) и Методических указаниях Российской Федерации (МУ 2.1.5.1183-03), использовать в качестве технической воды в системе оборотного водоснабжения.

Высокая степень очистки сточных вод и возможность их повторного использования в процессах мойки – актуальная задача.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 № 156 (приложение, п. 3. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование: рациональное использование, воспроизводство и управление водными ресурсами), а также научному направлению кафедры электроснабжения и электротехники БГАТУ. Выполнение задач, поставленных в диссертационной работе, отвечает направлениям реализации подпрограммы 5 «Чистая вода» Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28 января 2021 года № 50. В рамках плана НИР БГАТУ на 2016–2020 годы выполнялось задание «Интенсификация очистки сточных вод постов мойки машинных дворов в электромагнитном гидроциклоне» (проблема 4, задание 4.10).

Цель и задачи исследования

Целью работы является совершенствование электротехнологических устройств, созданием в них неоднородных электромагнитных полей, что обеспечивает доочистку сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники до показателей, позволяющих ее использование в системе оборотного технического водоснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- проанализировать существующие технологические схемы очистки сточных вод наружной мойки;
- изучить эффективность электрохимической коагуляции в неоднородном электрическом поле;
- оптимизировать режимы электрохимической очистки при условии минимизации удельного энергопотребления;
- проверить идею отделения коагулята путем воздействия на него неоднородного магнитного поля;
- разработать предложения по конструкции электромагнитной установки очистки;
- провести оценку качества очистки модельных сточных вод в аккредитованных аналитических лабораториях;
- определить экономическую эффективность электромагнитной установки очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники.

Объект исследования: сточные воды наружной мойки сельскохозяйственной техники, методы и технологическое оборудование их очистки.

Предмет исследования: процессы и технологии очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов состоят в следующем:

– впервые в установке очистки использовано неоднородное электрическое поле для электрохимической коагуляции загрязнений сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники, что в отличие от однородного электрического поля, позволило уменьшить энергозатраты на очистку, не ухудшая ее показатели;

– разработана макетная модель извлечения коагулята из очищаемых сточных вод, отличающаяся применением в одном устройстве электрической и магнитной флотации, что обеспечило эффективное снижение концентрации загрязнений до установленных показателей;

– разработана методика инженерного расчета электродной системы электрокоагулятора, отличающаяся учетом количества электричества, необходимого для образования требуемой дозы коагулянта;

– научно обоснованы технологические параметры электрохимической очистки, реализованной в устройстве очистки, отличающимся применением неоднородных электромагнитных полей, обеспечивающих очистку сточных вод до нормативных значений. Техническая новизна устройства очистки подтверждена патентом Республики Беларусь на изобретение;

– разработана эмпирическая модель минимизации энергозатрат на очистку сточных вод, отличающаяся учетом концентрации загрязнений, а также ограничений по производительности установки и плотности тока электрокоагуляции.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований электрохимической коагуляции загрязнений сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники, отличающиеся использованием неоднородного электрического поля для получения коагулянта (гидроксида железа) при меньших энергозатратах.

2. Установка очистки, отличающаяся применением неоднородных электромагнитных полей, обеспечивающих эффективное удаление коагулята из очищаемых сточных вод.

3. Методика инженерного расчета электродной системы электрокоагулятора, отличающаяся учетом количества электричества, необходимого для образования требуемой дозы коагулянта, нагрузки на единицу активной поверхности анода, а также расчетного расхода сточной воды.

4. Технологические режимы очистки, реализуемые в установке очистки, отличающиеся учетом плотности тока, исходной и конечной концентрации загрязнений, производительности установки, требуемых для эффективной очистки сточных вод.

5. Эмпирическая модель минимизации энергетических затрат на очистку сточных вод, отличающаяся учетом концентрации загрязнений, ограничений по производительности установки и плотности тока электрофлотокоагуляции.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты исследований получены автором под руководством кандидата технических наук, доцента А. В. Крутова. Совместно с ним определены цели и задачи исследования, обсуждались их результаты. Непосредственно соискателем проведен обзор литературы по теме диссертации, изготовлен макет лабораторной установки, проведено планирование многофакторного эксперимента, экспериментальные исследования, их обработка и формулировка выводов, подготовка публикаций по результатам исследований. Разработаны методика инженерного расчета электродной системы электрокоагулятора и методика расчета конусообразной индуктивной катушки с целью интенсификации очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники, эмпирическая модель минимизации параметров процесса очистки по энергетическим затратам. Соискателю принадлежит идея концентрации выделенных из стоков загрязнений воздействием неоднородного магнитного поля, что отражено в полученном патенте на изобретение. Одна статья [2] опубликована по материалам совместных исследований в соавторстве с аспирантом кафедры В. В. Боровской, в которых соискатель приготовил электрохимически активированные растворы на разработанной им лабораторной установке для испытания их воздействия на патогенные микроорганизмы. Консультативную помощь на этапе компьютерной обработки результатов оптимизации энергетической эффективности процесса очистки стоков оказали кандидаты технических наук, доценты Н. Н. Дечко и А. П. Мириленко, в соавторстве с которыми опубликованы статьи [4, 9].

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях: Международная конференция ведущих специалистов, молодых ученых и студентов «Сахаровские чтения 2003 года: экологические проблемы XXI века, Минск–2003; Международная научно-практическая конференция «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса сельскохозяйственной техники», Минск–2004; Международная научно-практическая конференция «Современные технологии и комплексы технических средств в сельскохозяйственном производстве», Минск–2005; 5-я Международная научно-техническая конференция «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», Москва–2006; Международные научно-технические конференции «Перспективы и направления развития энергетики АПК», Минск–2006, 2007; Международные научно-технические конференции «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК», Минск–2009, 2011, 2015, 2017, 2021;

Международная научно-практическая конференция «Роль непрерывного образования и вузовской науки в инновационном развитии АПК», Минск–2012; Международные научно-практические конференции «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве», Минск–2014, 2016, 2019; II Международная научно-практическая конференция «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции», Минск–2015; Международная научно-практическая конференция «Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства», Минск–2017; Республиканские научно-практические конференции «Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса»; Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2023, БЕЛАГРО-2025.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам проведенных исследований опубликовано 30 работ, объем которых соответствует 7,2 авторских листа. В их числе 9 статей из перечня научных изданий, рекомендованных ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертации – 4,3 а. л., 21 – в материалах и тезисах научных конференций, 1 патент Республики Беларусь на изобретение. Одна статья в научном журнале опубликована единолично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего список использованных источников из 111 наименований (в том числе 6 иностранных), и список публикаций соискателя из 30 наименований, 18 приложений. Общий объем диссертации составляет 170 страниц. Основная часть изложена на 97 страницах печатного текста, список использованных источников – на 15 стр., приложения – на 58 стр. Цифровой и графический материал (30 иллюстраций и 7 таблиц) занимает 10 стр.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснована актуальность темы и важность ее разработки. Приведены данные по сбросу сточных вод с превышением предельно допустимых концентраций загрязнений. Показано, что существующие технологии очистки сточных вод нуждаются в усовершенствовании так как позволяют устранить до 75 % – 95 % загрязнений.

В первой главе приведен обзор литературных источников по теме исследования. Рассмотрен состав загрязняющих веществ и их концентрации в сточных водах наружной мойки сельскохозяйственной техники. Выявлены загрязнения, наиболее сложно поддающиеся извлечению.

Обзор технологических схем очистки сточных вод показал, что на практике, как правило, применяются механические методы, а после – физико-химические.

Известны работы ученых по исследованию процессов обеззараживания и очистки сточных вод различных производств – Б. С. Ксенофонова, В. И. Ильина, С. В. Яковлева, В. А. Колесникова, Г. М. Шарфутдиновой, А. Г. Ветошкина, Е.А. Урецкого, М. Г. Грановского, В. В. Мороза и других, в которых рассматриваются наиболее эффективные способы очистки. Ими изучены технологии механической, физико-химической, электрохимической очистки сточных вод, предложены условия их применения. Ряд авторов утверждают, что при высоких концентрациях нефтепродуктов в сточных водах целесообразно применение электрохимического способа, который позволяет повысить степень очистки, уменьшить количество образующихся отходов, сократить требуемые для него производственные площади, а также дает возможность создания оборотных систем водопотребления, исключающих сброс технической воды в канализацию, или в окружающую среду.

Анализ электрохимического метода очистки показал, что его использование, сопряжено с определенными нерациональными затратами электроэнергии (излишним нагревом сточных вод) [5], это вызывает необходимость его усовершенствования, которое достигается применением неоднородного электрического поля. Кроме того, выявлено, что наиболее сложной технической задачей остается процесс отделения коагулята из общего потока сточных вод, прошедших электрообработку [3, 25].

В ходе обобщения анализа способов очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники сформулированы задачи исследований.

Во второй главе изложены теоретические предпосылки применения неоднородных электрических и магнитных полей при очистке сточных вод.

Рассмотрен механизм электрохимической коагуляции загрязнений. Согласно теории устойчивости и коагуляции дисперсных систем Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (теория ДЛФО) на поверхности эмульгированных частиц нефтепродуктов, других взвешенных частиц загрязнений формируется, в соответствии с правилом Кена, отрицательно заряженный электростатический слой. Одноименно заряженные частицы загрязнений отталкиваются друг от друга. При подаче напряжения на электроды, под воздействием внешнего электрического поля происходит растворение поверхностного слоя стального анода, и в процессе электрохимических реакций – образование коагулянта (гидроксида трехвалентного железа $Fe(OH)_3$). Для того, чтобы началась коагуляция загрязнений, нужно нарушить устойчивость дисперсной системы, преодолеть энергетический барьер, создаваемый двойным электрическим слоем (ДЭС) мицелл. Строение мицеллы коагулянта (золя гидроксида железа) показано на рисунке 1а.

Устойчивость коллоидного раствора характеризует ξ -потенциал (дзета-потенциал). С увеличением концентрации золя гидроксида железа диффузионный слой его мицелл сжимается, часть противоионов переходит из него в адсорбционный слой и ξ -потенциал коллоидной частицы

снижается с 60 мВ – 30 мВ до нуля, если все противоионы перейдут из диффузионного слоя в адсорбционный [8] (рисунок 1б).

Под воздействием сил электрического поля происходит разделение мицеллы на коллоидную частицу дисперсной фазы и ионы дисперсной среды. Заряженные отрицательно гранулы дисперсной фазы (например, эмульсии нефтепродуктов) перемещаются к аноду, а противоионы диффузионного слоя, заряженные положительно – к катоду. Одновременно, положительно заряженные гранулы гидроксида железа устремляются к катоду, а противоионы его мицеллы – к аноду. В этом случае происходит слипание частиц, имеющих разноименные заряды и движущихся на встречу друг другу.

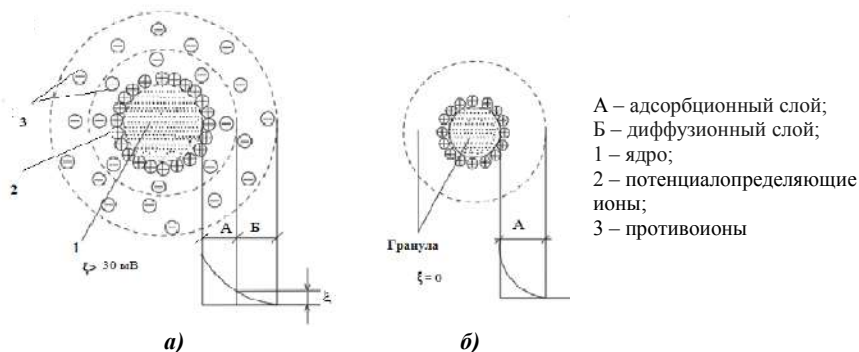


Рисунок 1 – Строение мицеллы тригидроксида железа (а) и его гранулы после разрыва поверхности скольжения (б)

При электрокоагуляции также имеет место явление поляризации загрязнений (неполярных коллоидных частиц) под воздействием электрического поля и полярных молекул воды. В результате этого у коллоидных частиц возрастают силы межмолекулярного притяжения (силы Ван-дер-Ваальса), образуются диполи. Согласно теории диполь-дипольного взаимодействия диполи полярной молекулы индуцируют образование противоположных концов в неполярных молекулах, что приводит к эффекту их ориентации [8].

В неполярной молекуле (эмульсия масла) возникает индуцированный электрический момент p_i , создаваемый полярными молекулами дисперсной среды и усиленный неоднородным электрическим полем. Дипольный момент масляной частицы:

$$\vec{p}_i = ql, \quad (1)$$

где q – заряд диполя, Кл; l – плечо диполя, м.

Под действием вектора напряженности электрического поля \vec{E} и силы $\vec{F} = q\vec{E}$ диполь поворачивается (рисунок 2).

На рисунке 2 \vec{E}_1, \vec{E}_k – векторы напряженности неоднородного электрического поля в точках расположения, соответственно, положительного и отрицательного зарядов диполя (В/м); \vec{F}_+, \vec{F}_- – векторы сил, действующих на положительный и отрицательный заряды диполя (Н). В неоднородном электрическом поле силы неравны по величине ($\vec{F}_+ \neq \vec{F}_-$). Они создают результирующую силу, $\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_-$, которая приводит диполь в поступательно-вращательное движение. Электрический момент диполя (его вектор \vec{p}_l) $|\vec{p}_l| = ql$, а момент сил:

$$M = FL = Fl \sin \gamma = qEl \sin \gamma, \quad (2)$$

где L – плечо момента силы, м; l – плечо диполя, м; γ – угол между осью диполя и горизонталью.

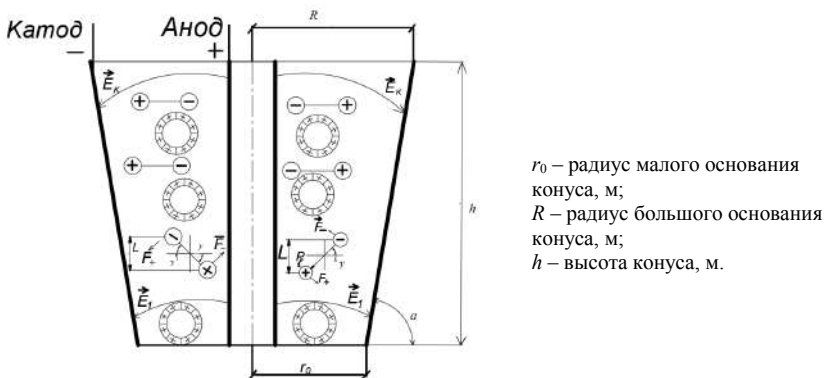


Рисунок 2 – Схематичные процессы ориентации диполей и коагуляции загрязнений

Вектор результирующей силы \vec{F} :

$$\vec{F} = -\text{grad}W_n = \text{grad}(p_l E \cos \gamma), \quad (3)$$

где $W_n = -p_l E \cos \gamma$ – потенциальная энергия диполя, Дж.

Изменение напряженности электрического поля вдоль плеча диполя взято вдоль направления вектора дипольного момента (от минуса к плюсу).

Вращающий момент $\vec{M} = [\vec{p}_l, \vec{E}]$ разворачивает диполь в направлении силовых линий вектора напряженности электрического поля \vec{E} . Поворот диполя происходит с одновременным его втягиванием в область более сильного поля, если $\vec{F}_+ < \vec{F}_-$. Если $\vec{F}_+ > \vec{F}_-$, поворот диполя сопровождается его выталкиванием в область менее сильного поля. В нашем случае

с ростом высоты конусной камеры электрокоагулятора напряженность электрического поля ослабевает. В общем виде вектор силы, действующий на диполь частицы загрязнения [8]:

$$\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q(\vec{E}_+ - \vec{E}_-) = ql \frac{\vec{E}_+ - \vec{E}_-}{l}. \quad (4)$$

Так как $|\vec{p}_l| = ql$, плечо диполя мало, тогда можно записать:

$$\vec{F} = \vec{p}_l \frac{d\vec{E}}{dl}, \quad (5)$$

где $d\vec{E}$ – изменение напряженности электрического поля на расстоянии dl , совпадающего с направлением дипольного момента \vec{p}_l ; $\frac{d\vec{E}}{dl}$ – градиент вектора напряженности электрического поля.

Энергия взаимодействия между частицами, согласно теории ДЛФО, будет учитывать энергию электростатического отталкивания одноименно заряженных агрегатов и энергию межмолекулярного притяжения [8]:

$$W = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 \varphi_\delta^2}{\lambda} e^{-\frac{a}{\lambda}} - \frac{A^*}{12\pi a^2}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость дисперсной среды, Ф/м; φ_δ – потенциал на границе раздела адсорбционного и диффузного слоев, В; a – расстояние между частицами, м; λ – толщина диффузного слоя противоионов, м; A^* – постоянная Гамакера, 10^{-19} Дж.

При избытке ионов коагулянта, его ДЭС углощается, заряд частиц увеличивается. В результате силы отталкивания между частицами коагулянта и частицами загрязнения преобладают силы притяжения. Возникает электростатическое отталкивание между диффузионными слоями. Начинается пептизация – процесс разрушения коагулянта на исходные агрегаты. Коагуляция прекращается. В дисперсной среде образуется золь. Происходит дополнительное загрязнение сточных вод за счет электрохимического разложения анода. Показатель химического потребления кислорода (ХПК) начинает увеличиваться.

Получено выражения для определения напряженности неоднородного электрического поля в электрокоагуляторе. Для рассматриваемой конфигурации электродов (рисунок 2) в цилиндрической системе координат параметры поля определены на плоскости, проходящей через ось симметрии и через радиальный вектор r . В остальной части пространства их получают вращением выбранной плоскости на любой угол.

Принято, что потенциал анода равен φ_a , а потенциал катода – φ_k , тогда для неоднородного электрического поля (катод – усеченный конус) можно записать зависимость потенциала [8]:

$$\varphi = \varphi(r) = \frac{\varphi_a - \varphi_k}{\ln \frac{r_a}{R}} \ln r + \frac{\varphi_k \ln r_a - \varphi_a \ln R}{\ln \frac{r_a}{R}} = \frac{U}{\ln \frac{r_a}{R}} \ln r + \frac{\varphi_k \ln r_a - \varphi_a \ln R}{\ln \frac{r_a}{R}}. \quad (7)$$

В (8) $\varphi_a - \varphi_k = U$ – приложенное к электродам коагулятора напряжение, В; а r_a – радиус анода, м. Так как $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$, то получим:

$$E = \left| \frac{d\varphi}{dr} \right| = \frac{U}{r_0 - r_a + h \text{ctg} \alpha}, \quad (8)$$

где U – напряжение на электродах, В; r_0 – радиус меньшего основания конуса, м; h – высота конуса, м; α – угол наклона образующей конуса, град.

В этой главе также рассмотрено воздействие магнитных полей на загрязняющие вещества в сточных водах. Известно, что на движущуюся частицу массой m и зарядом Q в магнитном поле действует сила Лоренца \vec{F}_L [3, 21, 23]:

$$\vec{F}_L = m \frac{d\vec{v}}{dt} = Q\vec{v}\vec{B}, \quad (9)$$

где Q – заряд частицы, Кл; \vec{v} – вектор скорости движения частицы, м/с; \vec{B} – вектор магнитной индукции, Тл.

В однородном магнитном поле заряженная частица движется со скоростью \vec{v} под углом α к вектору магнитной индукции \vec{B} (рисунок 3, а) [3].

Раскладывая вектор скорости на две составляющие: \vec{v}_n – параллельную вектору магнитной индукции и \vec{v}_r – перпендикулярную \vec{B} и, учитывая, что $\vec{v}_n \vec{B} = 0$, а $\vec{v}_r \vec{B} = vB$, из уравнения (10) получаем два уравнения [3, 12, 21]:

$$m \frac{d\vec{v}_n}{dt} = 0; \quad (10)$$

$$m \frac{d\vec{v}_r}{dt} = Q\vec{v}_r B, \quad (11)$$

где B – тангенциальная составляющая магнитной индукции, Тл.

Уравнение (10), решением которого является $\vec{v}_n = \text{const}$, описывает равномерное движение частицы, параллельное направлению вектора магнитной индукции \vec{B} . Из уравнения (11) следует, что частица движется в плоскости, перпендикулярной \vec{B} , с постоянным ускорением:

$$a = \frac{dv_r}{dt} = \frac{F_L}{m} = \frac{Qv_r B}{m}. \quad (12)$$

Такое движение является равномерным движением по винтовой линии, ось которой параллельна вектору индукции магнитного поля. Радиус винтовой линии:

$$R = \frac{v_r^2}{a} = \frac{mv_r}{QB} \quad (13)$$

Шаг винтовой линии:

$$h = v_n T = vT \cos \alpha, \quad (14)$$

где $T = \frac{2\pi R}{v}$ – период вращения частицы, с.

При движении заряженной частицы в неоднородном магнитном поле в направлении возрастания его напряженности силовые линии будут сходящимися, и движение происходит по винтовой линии с уменьшением радиуса (рисунок 3б) [3, 12, 14, 21].

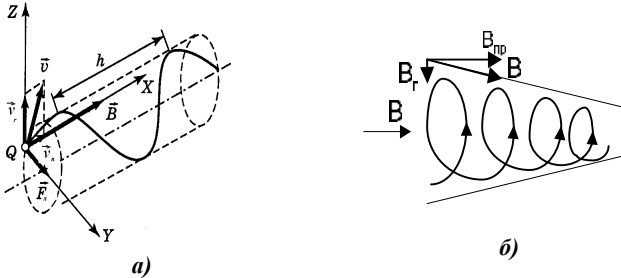


Рисунок 3 – Траектория движения заряженной частицы:
a – в однородном магнитном поле; *б* – в неоднородном магнитном поле

На примере однослойной конической катушки получено выражение для определения напряженности неоднородного магнитного поля (рисунок 4).

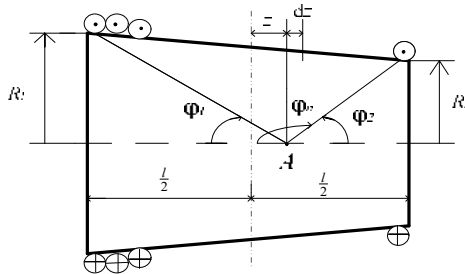


Рисунок 4 – К расчету напряженности магнитного поля конической однослойной катушки

На основании закона Био-Савара-Лапласа напряженность магнитного поля в любой точке вдоль оси конической катушки будет определяться выражением:

$$H = \frac{i N}{2 l_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = \frac{i N}{2 l_1} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2), \quad (15)$$

где I – ток в катушке, А; N – число витков катушки, шт.; $l_1 = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + l^2}$ – длина образующей линии конуса; R_1, R_2 – радиусы большего и меньшего оснований конуса; φ – угол между осью катушки и радиус-вектором.

Как видно из выражения (15) магнитное поле создается неоднородное, его напряженность будет увеличиваться в сторону уменьшения радиуса витков катушки. Такое поле можно использовать для извлечения коагулята.

Дана оценка удельной энергоёмкости процессов электрокоагуляции. При воздействии неоднородного электрического поля на загрязнения, которые представлены выше в виде диполей, они будут выстраиваться по направлению силовых линий напряженности. Чтобы диполи загрязнений транспортировать на поверхность, требуется использовать электрическую и магнитную флотацию. При этом будут иметь место затраты электроэнергии, которые следует минимизировать.

Прямые удельные энергозатраты будут зависеть от: исходной загрязненности сточных вод нефтепродуктами (г/м^3), производительности установки ($\text{м}^3/\text{ч}$), напряженности электрического поля в электрокоагуляторе, (В/м), плотности тока электрокоагулятора (А/м^2), напряженности магнитного поля в магнитном флотаторе (А/м) [3, 4, 5, 6, 8, 9].

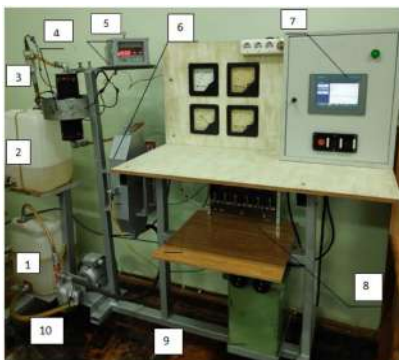
Удельные затраты (Дж/м^3) можно рассчитать по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = (jE + \frac{BH}{2})t = (jE + \frac{\mu_a H^2}{2})t, \quad (16)$$

где j – плотность тока электрокоагулятора, А/м^2 ; E – напряженность электрического поля в электрокоагуляторе, В/м ; B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность магнитного поля в магнитном флотаторе, А/м ; μ_a – магнитная проницаемость сердечника, Гн/м ; t – продолжительность очистки, ч.

Таким образом, чтобы добиться снижения концентрации загрязнений до показателей, позволяющих повторное использование технической воды при минимальных удельных энергозатратах на очистку, необходимо установить зависимость между влияющими факторами.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники. Описана экспериментальная установка (рисунок 5), изложена методика исследований [5, 8].



- 1 – резервуар исходной воды;
- 2 – резервуар очищенной воды;
- 3 – датчик кондуктометра;
- 4 – электромагнитный флотатор;
- 5 – кондуктометр;
- 6 – проточный электрокоагулятор;
- 7 – панель управления;
- 8 – выпрямитель;
- 9 – силовой трансформатор;
- 10 – насос с электроприводом

Рисунок 5 – Экспериментальная установка

Исследовано влияние материала электродов на эффективность очистки (рисунок 6). Обосновано преимущество стальных электродов.

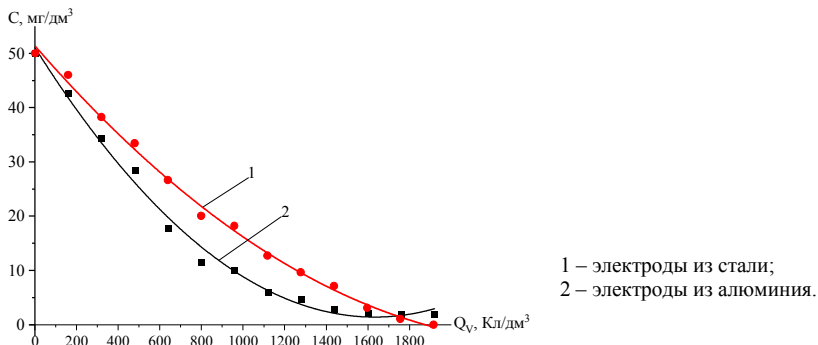


Рисунок 6 – Зависимость снижения концентрации нефтепродуктов в электролизере от количества электричества при использовании стальных и алюминиевых электродов

Подтверждено обеззараживающее действие продуктов электрохимической активации [2, 6, 15, 28, 29]. Опыты показали, что устойчивое обеззараживание сточных вод с колииндексом 5000 – 15000 достигается при смешивании их в равных объемах с анолитом, имеющим рН = 3, концентрацию активного хлора 3...5 мг/дм³. Достаточно сильное обеззараживающее действие анолита на вышеперечисленные тест-штаммы микроорганизмов было проявлено и при больших значениях рН, близких к 7,0. В этом случае концентрации гипохлорит-ионов и хлорноватистой кислоты примерно одинаковы, а расход количества электричества – в 2,3 раза меньше. Общее микробное число (титр КОЕ) в 1 мл приготовленного питательного раствора было равно нулю уже при концентрации активного хлора – 5 мг/дм³ и рН анолита, равном 6,5.

Представлены результаты исследований процесса электрохимической коагуляции с использованием однородного и неоднородного электрического поля. Зависимость роста температуры от количества электричества при однородном и неоднородном электрическом поле приведена на рисунке 7.

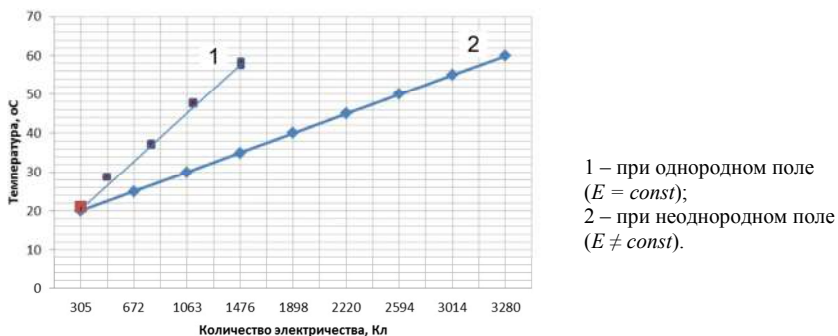


Рисунок 7 – Изменение температуры сточных вод от количества электричества при однородном ($E = const$) и неоднородном ($E \neq const$) электрическом поле

Установлено, что при напряженности однородного электрического поля 1,6–1,7 кВ/м и плотности тока 120–150 А/м² происходит электрокоагуляция нефтепродуктов и интенсивный нагрев очищаемых стоков. При электрохимической коагуляции в неоднородном электрическом поле продолжительность очистки практически не увеличилась, а энергозатраты уменьшились более чем в 1,4 раза.

Выполнено планирование эксперимента по определению энергозатрат и качества очистки. Установлено, что на энергетические затраты и конечную концентрацию загрязнений, при очистке сточных вод, влияют следующие факторы [4, 9]:

- X_1 – исходная концентрация загрязнений, мг/дм³;
- X_2 – производительность очистки, дм³/с;
- X_3 – плотность тока электрокоагулятора, А/м²;
- X_4 – напряженность электрического поля в электрокоагуляторе, В/м;
- X_5 – напряженность магнитного поля в магнитном флотаторе, А/м.

Так как через электрокоагулятор и электромагнитный флотатор проходит один и тот же ток, а напряженности электрического и магнитного полей связаны с плотностью тока, то с целью упрощения математической модели факторы X_4 и X_5 не варьировали и зафиксировали на следующих уровнях: напряженность электрического поля в электрокоагуляторе $X_4 = 600$ В/м, напряженность магнитного поля магнитного флотатора $X_5 = 10$ кА/м. Исследование зависимости удельных энергозатрат и конечной концентрации загрязнений от влияющих факторов проводилось с использованием метода планирования эксперимента в программе Statistica версии 10.0.

Для аналитического описания удельных энергетических затрат на очистку сточных вод Y_1 и их концентрации после очистки Y_2 использованы результаты 45 экспериментов (с учетом трехкратной повторности). Получены математические модели второго порядка для варьируемых факторов в натуральных показателях:

$$Y_1 = 1,745 + 0,000625X_1 - 0,01X_3 + 0,00005X_3^2, \quad (17)$$

$$Y_2 = 4,0994 - 0,0009125X_1 - 8,1667X_2 - 0,002667X_3 + 0,004083X_1X_2 + 0,00001333X_3^2. \quad (18)$$

Для вычисления коэффициентов регрессии использована матричная алгебра (Microsoft Excel и пакет компьютерных программ Statistica версии 10.0). Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. Незначимые коэффициенты исключались пошагово.

Подтверждена адекватность моделей (17), (18) путем использования анализа ANOVA и критерия Фишера. Поверхность отклика удельного расхода электроэнергии от исходной концентрации загрязнений и плотности тока приведена на рисунке 8.

Полученная математическая модель удельных затрат электроэнергии на очистку сточных вод имеет выпуклую поверхность. В зависимость удельного расхода энергии вошли исходная концентрация и плотность тока в электрокоагуляторе. При проведении экспериментов исходная концентрация загрязнений принята максимальная – 2200 мг/дм³. При этом обеспечена очистка от нефтепродуктов до требуемых нормируемых показателей (не более 3 мг/дм³). На практике исходная концентрация загрязнений может колебаться в широких пределах, обычно составляет 300 – 700 и не превышает 1000 мг/дм³.

С учетом полученных зависимостей и введением ограничений технологических параметров очистки сточных вод, сформулирована задача поиска экстремума целевой функции с ограничениями. В качестве целевой функции принят минимальный удельный расход электроэнергии на очистку.

$$\begin{cases} \min Y_1(c_1, j) = 1,745 + 6,25 \cdot 10^{-4} c_1 - 0,01j + 5,0 \cdot 10^{-5} j^2; \\ c_1 \leq 1850; \\ Y_2(c_1, g, j) = c_2 = 4,1 - 9,1 \cdot 10^{-4} c_1 - 8,17g - 2,67 \cdot 10^{-3} j + 4,1 \cdot 10^{-3} c_1 g + 1,33 \cdot 10^{-5} j^2; \\ c_2 \leq 3; \\ 60 \leq j \leq 120; \\ 0,4 \leq g \leq 0,7. \end{cases} \quad (19)$$

где $\min Y_1$ – целевая функция для нахождения минимального удельного потребления электроэнергии на очистку сточных вод, кВтч/м³; c_1 – область определения исходного параметра концентрации, мг/дм³.

Поверхность отклика удельных энергозатрат с оптимальными технологическими параметрами обработки сточной воды приведена на рисунке 9.

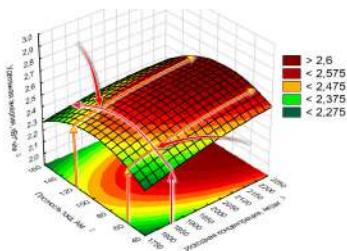


Рисунок 8 – Поверхность отклика удельных затрат энергии от исходной концентрации загрязнений и плотности тока на аноде

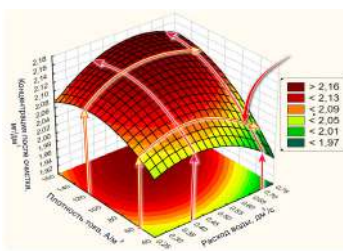


Рисунок 9 – Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и оптимальных значений плотности тока, производительности установки при исходной концентрации загрязнений до 1850 мг/дм³

Целевая функция задана полиномом второго порядка, поэтому у нее могут существовать только глобальные экстремумы при отсутствии локальных. Для решения задачи применен прямой поиск с оценкой целевой функции на границе области определения факторов и выбором минимального значения. В нашем случае целевая функция связана с двумя факторами. Поэтому она отображена как трехмерная поверхность и экстремум найден визуально. С учетом ограничений локальный минимум находится на границах области при значении плотности тока 60 А/м². Проверка по уравнению (17) регрессии для исходной концентрации до 1850 мг/дм³ показывает, что минимум удельных энергозатрат соответствует этому значению плотности тока и составляет 2,42 кВтч/м³ (рисунок 9).

В четвертой главе представлены технологические и конструктивные параметры электромагнитной установки очистки сточных вод. Приведена методика расчета электродной системы электрокоагулятора. Напряженность электрического поля в электрокоагуляторе будет определяться из выражения (9) [8]. Площадь боковой поверхности катода:

$$S_k = \pi l(R + r_0), \quad (20)$$

где R и r_0 – радиус, соответственно, большого и малого оснований конуса, м; l – длина боковой поверхности конуса, м.

Площадь боковой поверхности анода:

$$S_{аб} = \pi d_a h_a, \quad (21)$$

где d – диаметр анода, м; h – высота анода, м.

Расчетное количество растворенного анода (грамм) определяется по формуле [27]:

$$G_M = A_M I \tau K_M \eta, \quad (22)$$

где A_M – электрохимический эквивалент металла, г/(А·ч); I – ток, А; τ – продолжительность электролиза, ч; K_M – коэффициент, учитывающий повышенный реальный выход металла, по сравнению с расчетным ($K_M = 1,2 \dots 2,0$); η – коэффициент использования тока, принимается равным $0,7 - 0,9$.

На основании формулы (22) величина тока, необходимая для генерации расчетного количества металла (по данным эксперимента при дозе растворенного металла $D \leq 0,5 \text{ г/дм}^3$):

$$I = \frac{DG}{A_M K_M \eta}, \quad (23)$$

где D – доза металла, г/м³; где D – доза металла, г/м³; G – расчетная производительность электрокоагулятора, м³/ч.

При заданной плотности тока ($j = 60 \dots 100 \text{ А/м}^2$) и величине тока, для обеспечения требуемой дозы металла, площадь боковой поверхности анода ($S_{аб}, \text{ м}^2$) должна быть:

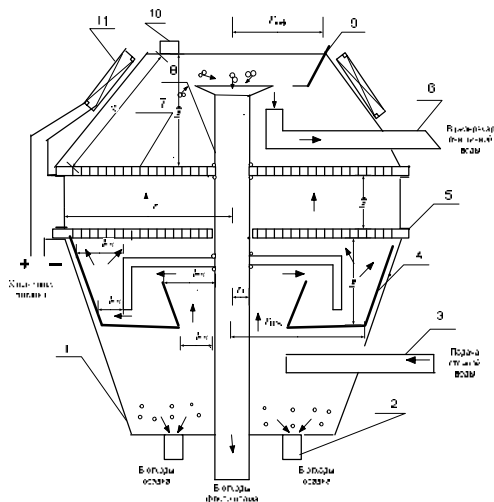
$$F_a = S_{аб} = \frac{I}{j}. \quad (24)$$

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований установка электромагнитной очистки (рисунок 10) должна обеспечивать поддержание следующих технологических режимов:

- удельный расход количества электричества – $135 \dots 270 \text{ Кл/дм}^3$;
- создавать напряженность электрического поля электрокоагулятора в диапазоне $400 \dots 800 \text{ В/м}$, плотность тока – $60 \dots 120 \text{ А/м}^2$;
- плотность тока электрофлотатора – $60 \dots 120 \text{ А/м}^2$;
- напряженность поля магнитного флотатора – $8 \dots 12 \text{ кА/м}$ (магнитная индукция $1,0 \dots 1,5 \text{ Тл}$);
- нагрев очищаемой воды – $25 \dots 28 \text{ }^\circ\text{C}$;
- производительность установки $0,4 \dots 0,7 \text{ дм}^3/\text{с}$;
- продолжительность очистки не более 2740 с .

С учетом того, что процесс коагуляции загрязнений происходит не мгновенно, а длится $7 - 8$ минут, то для увеличения времени пребывания очищаемой воды в зоне электрокоагуляции и ее объема камера электрохимической коагуляции в установке предложена двухсекционной. Объем установки составляет 120 дм^3 , а камеры электрокоагуляции – 50 дм^3 . Количество электричества, необходимое на очистку составляет $130 - 140 \text{ Кл/дм}^3$. При токе через коагулятор 6 А (плотности тока 60 А/м^2) и производительности установки $0,7 \text{ дм}^3/\text{с}$ для обеспечения требуемых показателей качества очистки, необходимо 16-ти кратная повторность прохождения одной порции

объема (120 дм³) по всем зонам электромагнитной обработки общей продолжительностью 2740 с.



- 1 – корпус устройства (винипласт); 2 – патрубок отвода шлама с краном;
- 3 – патрубок подачи очищаемой воды; 4 – катод усечено-конусовидный из нерастворимого материала; 5 – нерастворимый сетчатый катод;
- 6 – патрубок отвода очищенной воды; 7 – нерастворимый сетчатый анод;
- 8 – растворимый штыревой анод (труба-патрубок отвода коагулята);
- 9 – датчик уровня воды; 10 – патрубок отвода газов; 11 – катушка намагничивания

Рисунок 10 – Установка электромагнитной очистки сточных вод

В пятой главе дана сравнительная оценка технико-экономической эффективности применения двух способов очистки: химического – с последующей фильтрацией и ультрафиолетовым обеззараживанием, а также электрохимического – с отделением загрязнений в неоднородном электромагнитном поле и обеззараживанием образующимся гипохлоритом натрия [7, 12].

Результаты расчета показали, что очистка сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники после отстаивания с применением электрохимической коагуляции и электромагнитной флотации обеспечивает снижение концентрации загрязнений до предельно допустимых значений, позволяющих повторное использование технической воды. Это уменьшает потребление воды в 10 раз, снижает загрязнение окружающей среды нефтепродуктами и другими вредными веществами, способствует снижению негативного воздействия загрязнений на гидросферу и сельскохозяйственные угодья. Данная установка очистки позволяет получить экономический эффект в сумме 65 тыс. руб. в год при очистке в среднем до 2 м³/сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнены научно-технические исследования, направленные на усовершенствование электротехнологических устройств, обеспечивающих очистку сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники.

Основные научные результаты диссертации

1. Описан механизм влияния напряженности неоднородного электрического поля на коагуляцию загрязнений при электролизе сточных вод со стальным анодом. Разработана методика расчета напряженности неоднородного электрического поля в коагуляторе с соосно расположенными цилиндрическим анодом и конусообразным катодом [5, 8].

2. Разработана методика инженерного расчета электродной системы электрокоагулятора для создания неоднородного электрического поля, отличающаяся учетом требуемого удельного количества металла электрода, переходящего в раствор, применение которой обеспечивает требования, предъявляемые к технической воде оборотного водоснабжения [1, 5, 8, 17, 25, 27].

3. Предложена установка очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники, в которой получение коагулянта (гидроксида железа) достигается с меньшими в 1,4 раза энергозатратами. Конструкция электромагнитной установки обладает патентной чистотой. Разработана методика расчета конической индукционной катушки, отличающаяся созданием неоднородного магнитного поля током, протекающим в электрохимическом коагуляторе и электромагнитном флотаторе [3, 5, 21, 22, 23].

4. Экспериментально установлено влияние удельного расхода количества электричества при электрохимической коагуляции сточных вод на показатели качества технической воды. При исходной концентрации нефтепродуктов в сточной воде до 1850 мг/дм^3 и их электрокоагуляции с удельным расходом количества электричества 135 Кл/дм^3 образуется оптимальная доза гидроксида железа, который адсорбирует загрязнение. Показатели ХПК и БПК₅ снижаются до требуемых значений. При растворении анода свыше 1 г/дм^3 (удельный расход количества электричества 270 Кл/дм^3) в технической воде увеличивается содержание железа по сравнению с исходной концентрацией и превышает допустимую норму ($5,0 \text{ мг/дм}^3$), что сопровождается ростом ХПК и БПК₅, пептизацией коагулята [4, 5, 9, 20, 24, 27, 28, 30].

5. Применение электромагнитной установки очистки сточных вод дает экономический эффект в сумме 65 тыс. руб. в год без учета предотвращенного экономического ущерба в результате снижения уровня загрязнения окружающей среды. Себестоимость очистки составляет 53 руб./м^3 , что в 1,5 раза меньше, чем установками с использованием реагентов [7, 9, 10, 17, 18].

6. Разработана эмпирическая модель минимизации энергозатрат на электрохимическую коагуляцию при очистке сточных вод наружной мойки

сельскохозяйственной техники. Оптимальными являются производительность очистки $0,7 \text{ дм}^3/\text{с}$, плотность тока на аноде 60 А/м^2 , исходная концентрации загрязнений до 1850 мг/дм^3 , конечная -3 мг/дм^3 и менее. Средние значения напряженности неоднородного электрического поля – 600 В/м , неоднородного магнитного поля – 10 кА/м . Удельный расход электроэнергии составляет $2,4 - 2,5 \text{ кВтч/м}^3$, что на $20\% - 30\%$ ниже известных аналогичных установок очистки сточных вод [6, 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационных исследований внедрены в УО «БГАТУ» в учебный процесс на кафедре электроснабжения и электротехники (акт № Уп-44 от 12.09.2016), в образовательный процесс на кафедре электротехнологии (акт № Уп-39 от 17.12.2020). Изготовлен экспериментальный макет установки по результатам научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ (НИОК(Т)Р (акт № Уп-39/и от 17.12.2020), используемый при изучении курса «Инновационные технологии» в рамках магистерской подготовки по специальности 1-74 80 76 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства». Разработана и запатентована конструкция трехпродуктового гидроциклона для очистки сточных вод. В РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси» получена справка о возможном использовании (внедрении) результатов диссертационного исследования в области охраны окружающей среды при техническом обслуживании автотракторной техники сельскохозяйственных и других организаций.

Разработанная электромагнитная установка и полученные режимы очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники с применением электрохимической коагуляции и электромагнитной флотации могут быть использованы не только при проектировании постов наружной мойки сельскохозяйственных организаций, но и в автопарках, на станциях технического обслуживания автомобилей. Внедрение результатов исследования способствует охране гидросферы, применению экологически чистых оборотных систем использования водных ресурсов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в изданиях из перечня изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Крутов, А. В. Электрохимическая очистка сточных вод машинных дворов сельскохозяйственных организаций / А. В. Крутов, М. А. Бойко, А. П. Мартинович // *Агропанорама*. – 2004. – № 5. – С. 28–31.
2. Крутов, А. В. Обеззараживание дренажных вод при выращивании овощей способом малообъемной гидропоники / А. В. Крутов, М. А. Бойко, В. В. Боровская // *Агропанорама*. – 2011. – № 5. – С. 13–16.
3. Крутов, А. В. Удаление взвешенных частиц в электромагнитном гидроциклоне при очистке сточных вод / А. В. Крутов, М. А. Бойко // *Агропанорама*. – 2016. – № 2. – С. 33–37.
4. Крутов, А. В. Оптимизация процесса очистки сточных вод постов мойки автотракторной техники по энергетическим затратам / А. В. Крутов, М. М. Дечко, М. А. Бойко // *Наука и техника*. – 2019. – № 5. – С. 436–442.
5. Крутов, А. В. Повышение эффективности электрокоагуляции топливно-смазочных фракций в сточных водах моек сельскохозяйственной техники путем их обработки в неоднородном электрическом поле / А. В. Крутов, М. А. Бойко // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2022. – № 5. – С. 153–158.
6. Бойко, М. А. Повышение степени очистки и обеззараживания стоков постов мойки автотракторной техники электротехнологическими методами / М. А. Бойко // *Агропанорама*. – 2024. – № 1. – С. 29–33.
7. Крутов, А. В. Эколого-экономическая эффективность установки для очистки сточных вод постов мойки сельскохозяйственной техники с применением неоднородных электромагнитных полей / А. В. Крутов, М. А. Бойко // *Агропанорама*. – 2024. – № 2. – С. 31–37.
8. Бойко, М. А. Механизм коагуляции загрязнений при электрохимической очистке сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники / М. А. Бойко, А. В. Крутов // *Агропанорама*. – 2025. – № 2. – С. 17–24.
9. Бойко, М. А. Обоснование технологических параметров электромагнитной установки очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники / М. А. Бойко, А. В. Крутов, А. П. Мириленко // *Агропанорама*. – 2025. – № 4. – С. 14–20.

Материалы конференций и тезисы докладов

10. Крутов, А. В. Исследование электрокоагуляции нефтесодержащих сточных вод / А. В. Крутов, М. А. Бойко, А. П. Мартинович // VIII Республиканская науч.-техн. конф., Минск, 9–10 декабря 2003 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; [редкол.: Б. М. Хрусталеv и др.]. – Минск : БНТУ, 2003. – С. 214–215.
11. Крутов, А. В. Электротехнологический способ очистки сточных вод наружного поста мойки сельскохозяйственной техники / А. В. Крутов,

М. А. Бойко, А. П. Мартинович // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса сельскохозяйственной техники : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–8 апреля 2004 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол. : И. Н. Шило и др.]. – Минск : БГАТУ, 2004. – Ч. 1. – С. 154–160.

12. Крутов, А. В. Экономическое обоснование природоохранных мероприятий при мойке сельскохозяйственной техники / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Современные технологии и комплексы технологических средств в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25–27 мая 2005 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. Л. В. Мисуна. – Минск : БГАТУ, 2005. – С. 193–194.

13. Крутов, А. В. Очистка сточных вод постов мойки сельскохозяйственной техники с использованием электрических и магнитных полей / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике : труды 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 16–17 мая 2006 г. / Всерос. инст. электр. сел. хоз. ; под ред. Н. Ф. Молоснова. – М. : ВИЭСХ, 2006. – С. 230–233.

14. Крутов, А. В. Использование электромагнитного гидроциклона в процессах очистки нефтесодержащих сточных вод / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Перспективы и направления развития энергетики АПК : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29–30 ноября 2006 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол. : М. А. Прищепов и др.]. – Минск : БГАТУ, 2006. – С. 192–195.

15. Крутов, А. В. Обеззараживание сточных вод машинных дворов продуктами электрохимической активации / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Перспективы и направления развития энергетики АПК : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 ноября 2007 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. М. А. Прищепова. – Минск : БГАТУ, 2007. – С. 246–249.

16. Крутов, А. В. Математические модели силового воздействия переменного электромагнитного поля на водные дисперсные системы / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 октября 2009 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол. : М. А. Прищепов и др.]. – Минск : БГАТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 167–170.

17. Крутов, А. В. Комбинированная очистка сточных вод постов мойки в неоднородном электрическом поле постоянного тока / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Перспективы развития энергетики в XXI веке : материалы II Республик. науч.-практ. конф., Минск, 11–13 мая 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; [редкол. : С. М. Силюк и др.]. – Минск : БНТУ, 2011. – С. 75–76.

18. Крутов, А. В. Доочистка стоков постов мойки автотракторной техники применением метода электрофлотокоагуляции / А. В. Крутов, М. А. Бойко, М. М. Суворов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного

развития АПК : материалы Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 24–25 ноября 2011 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол.: М. А. Прищепов и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – С. 210–213.

19. Крутов, А. В. Замкнутая система водоснабжения поста мойки сельскохозяйственной техники с использованием электрофлоккоагуляционной очистки стоков / А. В. Крутов, М. А. Бойко, М. М. Суворов // Роль непрерывного образования и вузовской науки в инновационном развитии АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–28 января 2012 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; под общ. ред. Н. В. Казаровца. – Минск : БГАТУ, 2012. – С. 144–147.

20. Крутов, А. В. Доочистка стоков автомоек в электроустановке с неоднородными электрическими и магнитными полями / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 октября 2014 г.: в 2 ч. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол.: И. Н. Шило и др.]. – Минск : БГАТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 162–164.

21. Крутов, А. В. Очистка жиросодержащих сточных вод мясо-молочных перерабатывающих производств / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сборник статей II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 марта 2015 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; под общ. ред. В. Я. Груданова. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 247–250.

22. Бойко, М. А. Автоматизация процесса очистки сточных вод моек автотракторной техники / М. А. Бойко, А. В. Крутов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : сборник науч. статей Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–27 ноября 2015 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. М. А. Прищепова. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 317–319.

23. Крутов, А. В. Использование комбинации силовых полей для интенсификации разделения эмульсии в очистном циклонном аппарате / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции : сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2–3 июня 2015 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. В. Б. Ловкиса. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 47–53.

24. Крутов, А. В. Удаление взвешенных частиц при очистке нефтесодержащих сточных вод воздействием неоднородного магнитного поля / А. В. Крутов, М. А. Бойко, В. Ю. Васильев // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2016 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол.: Н. Н. Романюк и др.]. – Минск : БГАТУ, 2016. – С. 208–210.

25. Крутов, А. В. Воздействие неоднородного магнитного поля на заряженные частицы при очистке нефтесодержащих сточных вод / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Энергосбережение – важнейшее условие

инновационного развития АПК : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 ноября 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. М. А. Прищепова. – Минск : БГАТУ, 2017. – С. 238–240.

26. Крутов, А. В. Идентификация процесса электрофлотокоагуляционной очистки поста мойки автотракторной техники / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 ноября 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. М. А. Прищепова. – Минск : БГАТУ, 2017. – С. 241–243.

27. Крутов, А. В. Управление по току процессом электрофлотокоагуляции стоков постов мойки автотракторной техники при их очистке / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сборник науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–23 ноября 2018 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол.: В. П. Чеботарев и др.]. – Минск : БГАТУ, 2018. – С. 303–305.

28. Крутов, А. В. Использование электрохимических активированных водных растворов поваренной соли как дезинфицирующих средств в сельскохозяйственном производстве / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 октября 2019 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; [редкол.: И. Н. Шило и др.]. – Минск : БГАТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 343–345.

29. Крутов, А. В. Электротехнология очистки и обеззараживания стоков моек автотракторной техники / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса : материалы Республ. науч.-практ. конф., Горки, 8 июня 2023 г. / Белорус. гос. сел. хоз. акад. ; под ред. В. А. Самсоновича. – Горки : БГСХА, 2023. – С. 53–56.

30. Крутов, А. В. Очистка сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники в электрофлотокоагуляторе с электромагнитным гидроциклоном / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса : материалы Республ. науч.-практ. конф., Горки, 6 июня 2025 г. / Белорус. гос. сел. хоз. акад. ; под ред. В. А. Самсоновича. – Горки : БГСХА, 2025. – С. 124–127.

Патенты на изобретения

31. Трехпродуктовый гидроциклон для очистки сточных вод : патент 21229 Респ. Беларусь, МПК51 С 02F 9/02 / А. В. Крутов, М. А. Бойко, М. М. Суворов; заявитель УО «БГАТУ». – № а 20140159; заявл. 2014.03.10 ; опубл. 30.08.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 4. – С. 90–91.

РЕЗЮМЕ

Бойко Михаил Анатольевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАРУЖНОЙ МОЙКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИМЕНЕНИЕМ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ключевые слова: сточные воды, электрохимическая коагуляция, электрическая флотация, электромагнитное поле, очистка, обеззараживание.

Цель исследований: совершенствование электротехнологических устройств, созданием в них неоднородных электромагнитных полей, что обеспечивает доочистку сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники до показателей, позволяющих ее использование в системе оборотного технического водоснабжения.

Методы исследований: при решении поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследований; при расчете неоднородного электрического поля – элементы теории симметрии; при решении задач оптимизации – методы математического моделирования, теоретического анализа, натурного эксперимента.

Полученные результаты и их новизна: впервые предложено использование неоднородного электрического поля для электрохимической коагуляции загрязнений сточных вод. Для удаления из очищаемых стоков коагулята впервые предложено применение неоднородного магнитного поля. Научно обоснованы технологические параметры электрохимической очистки, реализуемой в электромагнитной установке. Разработана методика инженерного расчета электродной системы электрокоагулятора для создания неоднородного электрического поля. Получена эмпирическая модель минимизации энергетических затрат на очистку сточных вод.

Техническая новизна устройства очистки подтверждена патентом Республики Беларусь на изобретение.

Рекомендации по практическому использованию результатов, область применения: разработанная электромагнитная установка и полученные режимы очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники с применением электрохимической коагуляции и электромагнитной флотации могут быть использованы не только при проектировании постов наружной мойки сельскохозяйственных организаций, но и в автопарках, на станциях технического обслуживания автомобилей.

SUMMARY

Boyko Mikhail Anatolievich

IMPROVEMENT OF ELECTROTECHNOLOGICAL DEVICES FOR AFTERTREATMENT OF WASTE WATER OF EXTERNAL WASHING OF AGRICULTURAL MACHINERY USING HETEROGENEOUS ELECTROMAGNETIC FIELDS

Key words: wastewater, electrochemical coagulation, electric flotation, electromagnetic field, purification, disinfection.

Purpose of research: improvement of electro-technological devices by creating non-uniform electromagnetic fields in them, which ensures the additional treatment of wastewater from the external washing of agricultural machinery to indicators that allow its use in the circulating technical water supply system.

Research methods: in solving the assigned problems, theoretical and experimental research methods were used; in calculating the non-uniform electric field, elements of symmetry theory were used; in solving optimization problems, methods of mathematical modeling, theoretical analysis, and natural experiments were used.

The results obtained and their novelty: application of non-uniform electric field for electrochemical coagulation of sewage contaminants is proposed for the first time. To remove coagulate from the treated effluents, the first use of a heterogeneous magnetic field has been proposed. The technological parameters of electrochemical cleaning implemented in an electromagnetic installation are scientifically substantiated. A method of engineering calculation of the electrode system of the electric coagulator has been developed to create an inhomogeneous electric field. An empirical model of minimizing energy costs for wastewater treatment was obtained.

The technical novelty of the cleaning device is confirmed by the patent of the Republic of Belarus for the invention.

Recommendations for the practical use of the results, scope of application: the developed electromagnetic installation and the obtained wastewater treatment modes for external washing of agricultural machinery using electrochemical coagulation and electromagnetic flotation can be used not only in the design of external washing stations for agricultural organizations, but also in vehicle depots and at vehicle service stations.

РЭЗІЮМЭ

Бойка Міхаіл Анатольевіч

УДАСКАНАЛЕННЕ ЭЛЕКТРАТЭХНАЛАГІЧНЫХ ПРЫЛАД ДААЧЫСТКІ СЦЁКАВЫХ ВОД ВОНКАВАЙ МЫЙКІ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ТЭХНІКІ ПРЫМЯНЕННЕМ НЕАДНАРОДНЫХ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ПАЛЁЎ

Ключавыя словы: сцёкавыя воды, электрахімічная каагуляцыя, электрычная флатацыя, электрамагнітнае поле, ачыстка, абеззаражанне.

Мэта даследаванняў: удасканаленне электратэхналагічных прылад, стварэннем у іх неаднародных электрамагнітных палёў, што забяспечвае даачыстку сцёкавых вод вонкавай мыйкі сельскагаспадарчай тэхнікі да паказчыкаў, якія дазваляюць яе выкарыстанне ў сістэме абаротнага тэхнічнага водазабеспячэння.

Метады даследаванняў: пры расшэнні пастаўленых задач выкарыстоўваліся тэарэтычныя і эксперыментальныя метады даследаванняў; пры разліку неаднароднага электрычнага поля – элементы тэорыі сіметрыі; пры вырашэнні задач аптымізацыі – метады матэматычнага мадэлявання, тэарэтычнага аналізу, натурнага эксперыменту.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню прапанавана выкарыстанне неаднароднага электрычнага поля для электрахімічнай каагуляцыі забруджванняў сцёкавых вод. Для выдалення з ачышчальных сцёкаў каагуляту ўпершыню прапанавана адначасовае прымяненне электрычнай і магнітнай флатацыі. Навучна абгрунтаваны тэхналагічныя параметры электрахімічнай ачысткі, якая рэалізуецца ў электрамагнітнай устаноўцы. Распрацавана методыка інжынернага разліку электроднай сістэмы электракаагулятара для стварэння неаднароднага электрычнага поля. Атрымана эмпірычная мадэль мінімізацыі энергетычных затрат на ачыстку сцёкавых вод.

Тэхнічная навізна ачышчальнай прылады пацверджана патэнтам Рэспублікі Беларусь на вынаходства.

Рэкамендацыі па практычным выкарыстанні вынікаў, вобласць прымянення: распрацаваная электрамагнітная ўстаноўка і атрыманыя рэжымы ачысткі сцёкавых вод вонкавай мыйкі сельскагаспадарчай тэхнікі з прымяненнем электрахімічнай каагуляцыі і электрамагнітнай флатацыі могуць быць скарыстаны не толькі пры праектаванні пастоў вонкавай мыйкі сельскагаспадарчых арганізацый, але і ў аўтапарках, на станцыях тэхнічнага абслугоўвання аўтамабіляў.

Научное издание

Бойко Михаил Анатольевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАРУЖНОЙ МОЙКИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

Ответственный за выпуск М. А. Бойко
Компьютерная верстка М. А. Бойко

Подписано в печать 23.02.2026. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 60 экз. Заказ 143.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.