жима зданий: дис. … канд. техн. наук: 05.13.18 / Нагорная А.Н.; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2008. – 148 с.

15. Сканави, А.Н. Конструирование и расчет водяного и воздушного отопления зданий / А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1983. – 304 с.

16. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03-2019. – Минск: Мин-во строительства и архитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 68 с.

17. Строительная климатология. Изменение № 1: СНБ 2.04.02-2000. – Минск: Мин-во строительства и архитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 33 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.12.2024

УДК 66.087.5:628.3:681.3
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-17-24

МЕХАНИЗМ КОАГУЛЯЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД НАРУЖНОЙ МОЙКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

М.А. Бойко,
ст. преподаватель каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ

А.В. Крутов,
доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье рассмотрен механизм коагуляции коллоидных частиц загрязнений в сточных водах наружной мойки сельскохозяйственной техники. Определены режимы электрообработки. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: коллоидные дисперсии, коагуляция, гидроксид железа, двойной электрический слой, мицелла, потенциалопределяющие ионы, противоионы, дзета-потенциал.

The article considers the mechanism of coagulation of colloidal particles of pollutants in wastewater of external washing of agricultural machinery. The modes of electrical treatment are determined, and the results of experimental studies are given.

Key words: colloidal dispersions, coagulation, iron hydroxide, double electric layer, micelle, potential-determining ions, counterions, zeta potential.

Введение

В соответствии с санитарными нормами [1] на территории машинного двора должен предусматриваться участок мойки транспорта (открытая или закрытая мойка с отстойниками для предварительной очистки стоков). После первичного отстойника и удаления всплывших нефтепродуктов, сточные воды наружной мойки сельскохозяйственной техники представляют собой дисперсную систему, содержащую в себе суспензии, коллоидные частицы различной химической природы и размеров. В стоках наружной мойки присутствуют почвенно-растительные примеси и различные топливно-смазочные фракции. В зависимости от выполняемых работ могут появляться включения минеральных и органических удобрений, патогенных организмов. Отведение таких стоков в канализацию или на рельеф допустимо только после их очистки. Анализ существующей практики очистки подобных стоков показал целесообразность применения электрохимической коагуляции загрязнений, их окисления и обеззараживания. В процессе электрохимической очистки происходит удаление взвешенных веществ, нефтепродуктов, а также других загрязнений до показателей, предусмотренных в источниках [2, 3]. Очищенная вода может использоваться в оборотных системах водоснабжения моек. При использовании очищенных стоков в открытых системах технического водоснабжения не только достигается их эпидемическая безопасность, соответствие требованиям моечных устройств по качеству воды, а также обеспечиваются ее безвредность по химическому составу и благоприятные органолептические свойства.

Известна теория устойчивости и коагуляции дисперсных систем Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (теория ДЛФО). Проблеме очистки и обеззараживания сточных вод различных производств посвящены работы В.Я. Баранова, О.Р. Каратаева, И.А. Нечаева, Т.А. Савицкой, О.В. Смирнова, Л.И. Соколова, R. Hogg (Р. Хогга), P. K. Holt (П.К. Холта), О.С. Хрипуновой и других [4-12].

Целью данной работы является снижение концентрации загрязнений сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники до допустимых пока-

зателей качества для использования в системе оборотного водоснабжения путем воздействия на стоки электромагнитных полей.

Основная часть

Электрохимическая очистка сточных вод предполагает их электролиз и разложение стального анода, в результате чего образуется хлорное железо $FeCl_3$, а на катоде при электролизе происходит разложение воды с накоплением едкого натра NaOH или едкого калия KOH и выделение пузырьков газообразного водорода:

$$2H_2O + 2e = H_2 + 2OH^-.$$

Далее происходит реакция между $FeCl_3$ и щелочью, например:

$$FeCl_3 + 3NaOH = Fe(OH)_3 + 3NaCl.$$

Полученный таким образом тригидроксид железа является хорошим коагулянтом и сорбентом углеводородных частиц дисперсной фазы сточных вод. Применение железных электродов имеет свои преимущества по сравнению с электродами из алюминия, так как они дешевле. Соли железа, как коагулянты, имеют ряд преимуществ по сравнению с солями алюминия. Их действие лучше при низких температурах и применимы более широкие пределы оптимальных значений pH среды. Опыты показали, что хлопья гидроксида железа обладают большей прочностью, стабильны при наличии в стоках разнообразного солевого состава и более эффективно устраняют запахи, обусловленные присутствием нефтепродуктов, сероводорода. Кроме того, адсорбируя загрязнения, золь гидроксида железа (III) обладает магнитными свойствами, что позволяет применить электромагнитное поле для управления движением агрегатных частиц и для интенсификации их удаления. Следует отметить также, что для разложения стального анода требуется почти в два раза меньше электроэнергии, чем алюминиевого [4], что подтверждено и нашими опытами (в 1,5 раза).

Механизм коагуляции загрязнений, согласно теории ДЛФО, состоит в следующем. На поверхности эмульгированных частиц нефтепродуктов и 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 разложение анода, и в процессе электрохимических реакций – образование коагулянта (гидроксида трехвалентного железа). Для того чтобы началась коагуляция загрязнений необходимо нарушить устойчивость дисперсной системы, преодолеть энергетический барьер, создаваемый двойным электрическим слоем (ДЭС) мицелл. Строение мицеллы коагулянта (золя гидроксида железа) приведено на рисунке 1а. Схематически строение этой мицеллы изображают следующим образом:

$$\{[Fe(OH)_3]m\ nFeO^+\ (n-x)\ Cl^-\}\ xCl^-,$$

где m – количество частиц, входящих в состав ядра;

n – количество потенциалопределяющих ионов (ПОИ);

$(n - x)$ – количество противоионов (ПИ) адсорбционного слоя;

x – количество противоионов диффузионного слоя [6, 7].

ДЭС мицеллы гидроксида железа препятствует процессу коагуляции.

Величину электростатических сил отталкивания, т.е. устойчивость коллоидного раствора, характеризует дзета-потенциал (ξ – потенциал). У нейтральной мицеллы необходимо разрушить поверхность диффузионного слоя. 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 60-30 мВ до нуля, если все противоионы перейдут из диффузионного слоя в адсорбционный [7] (рис.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) будут перемещаться 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 (рис. 2). В этом случае имеет место электрофорез частиц, в процессе которого происходит слипание тех из них, которые имеют разноименные заряды, движущиеся навстречу друг другу.

Следует заметить, что при коагуляции наблюдается еще явление поляризации загрязнений (неполярных коллоидных частиц) под воздействием электрического поля и полярных молекул воды. В результате этого у коллоидных частиц возрастают силы Ван-дер-Ваальса (силы межмолекулярного притяжения), образуются диполи [6; 8; 12]. Согласно теории дипольдипольного взаимодействия, диполи полярной молекулы индуцируют образование противоположных концов в неполярных молекулах, что приводит к эффекту их ориентации. В неполярной молекуле (эмульсия масла) возникает индуцированный электрический момент p_l, создаваемый полярными молекулами дисперсной среды и усиленный неоднородным электрическим полем. Дипольный момент масляной частицы (рис. 3):

$$\vec{p}_l = ql,$$

где q – заряд диполя, Кл;

l – плечо диполя, м.

Вектор поляризации диполя $\vec{P}$, Кл/м^2:

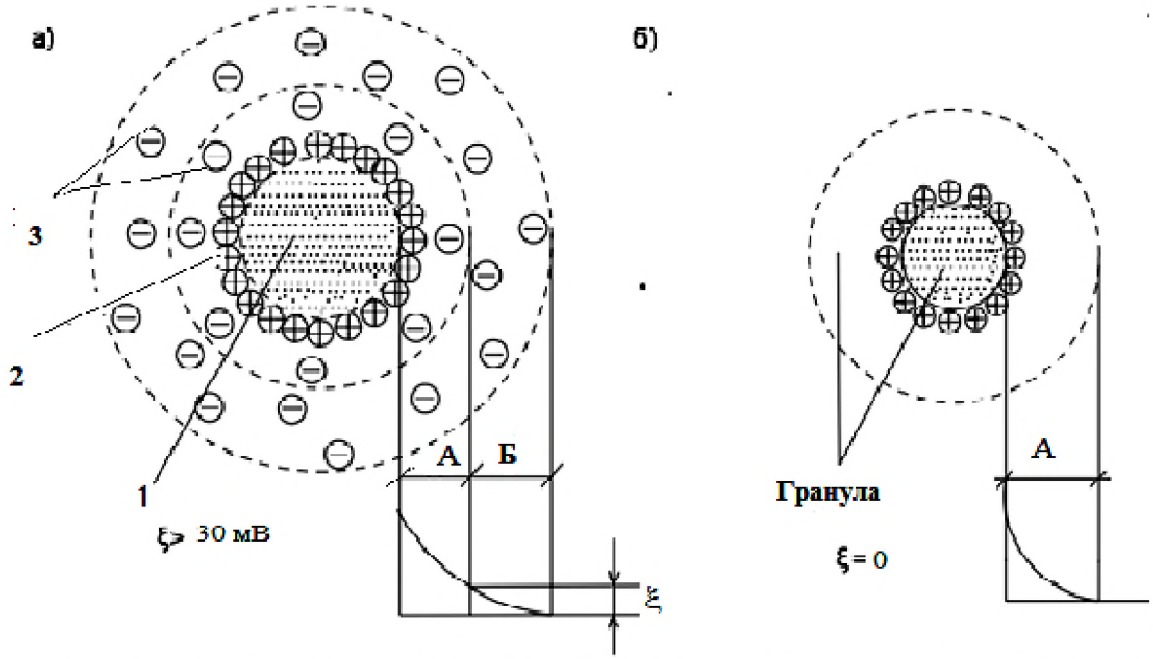

Рисунок 1. Строение мицеллы тригидроксида железа (а) и его гранулы после разрыва поверхности скольжения (б): А – адсорбционный слой; Б – диффузионный слой; 1 – ядро; 2 – потенциалопределяющие ионы; 3 – противоионы

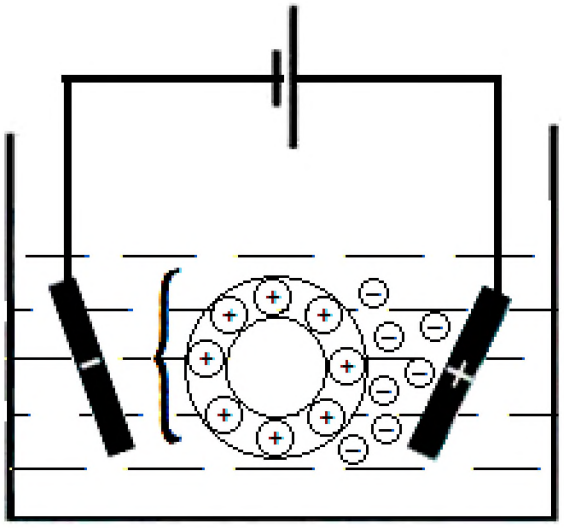

Рисунок 2. Иллюстрация разрушения диффузионного слоя мицеллы гидроксида железа и явления электрофореза

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_o\vec{E} = \frac{\sum_i p_{li}}{\Delta V} = \frac{Np_{li}}{\Delta V} = np_{li},$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость эмульсии нефтепродукта;

ε_o – электрическая постоянная, Ф/м;

$\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля, В/м;

N – число молекул в объеме ΔV, n – концентрация молекул.

Число частиц загрязнений определяют с учетом их исходной концентрации, гранулометрического состава, удельной плотности загрязнений.

Под действием вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и силы $\vec{F}$ диполь поворачивается (рис. 3) $\vec{F} = q\vec{E}$. 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: $M = FL = Fl\sin\alpha = qEl\sin\alpha$,

где $\vec{E}, \vec{E}_1, \vec{E}_k$ – векторы напряженности неоднородного электрического поля результирующего и в точках расположения, соответственно, положительного и отрицательного зарядов диполя, В/м;

$\vec{F}, \vec{F}_+, \vec{F}_-$ – векторы силы результирующей и действующие на положительный и отрицательный заряды диполя, Н;

l – плечо диполя, м;

L – плечо момента силы, м;

α – угол между осью диполя и горизонталью.

Вектор результирующей силы $\vec{F}$:

$$\vec{F} = -\mathrm{grad}W_{\text{п}} = \mathrm{grad}(p_l E\cos\alpha),$$

где $W_{\text{п}} = -p_l E\cos\alpha$ – потенциальная энергия диполя, Дж.

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

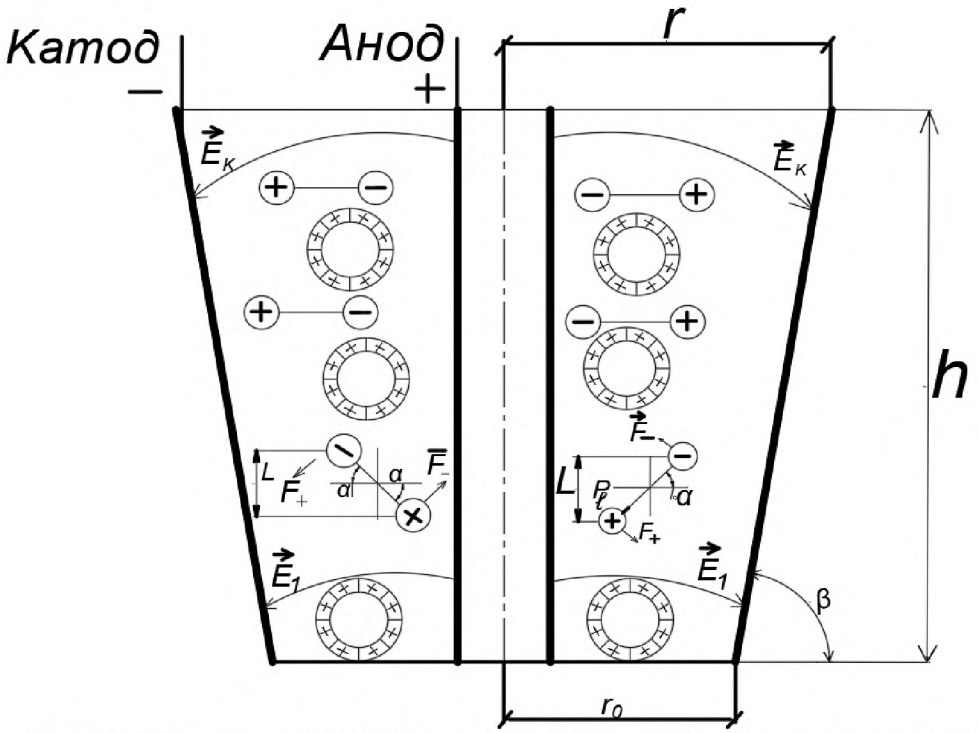

Рисунок 3. Схематичные процессы ориентации диполей и коагуляции загрязнений

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 $(\vec{F}_+ \prec \vec{F}_-)$. Если $(\vec{F}_+ \succ \vec{F}_-)$, то поворот диполя сопровождается его выталкиванием в область менее сильного поля (рис. 3). В нашем случае с ростом высоты конусной камеры электрокоагулятора напряженность электрического поля ослабевает.

В общем виде вектор силы, действующий на диполь частицы загрязнения: $\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q(\vec{E}_+ - \vec{E}_-) = q\frac{\vec{E}_+ - \vec{E}_-}{l}$. Так как $|\vec{p}_l| = ql$, плечо диполя мало, тогда можно записать:

$$\vec{F} = \vec{p}_l \frac{d\vec{E}}{dl},$$

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

$d\vec{E} / dl$ – градиент вектора напряженности электрического поля.

Энергия взаимодействия между частицами, согласно теории ДФЛО, будет учитывать энергию электростатического отталкивания одноименно заряженных агрегатов и энергию межмолекулярного притяжения:

$$W = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 \varphi_\delta^2}{\lambda} e^{-\frac{a}{\lambda}} - \frac{A^*}{12\pi a^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_r\varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость дисперсной среды, Ф/м;

φ_δ – потенциал на границе раздела адсорбционного и диффузионного слоев, В;

a – расстояние между частицами, м;

λ – толщина диффузионного слоя противоионов, м;

A^* – постоянная Гаммакера, 10^{-19} Дж.

В формуле (1) первое слагаемое есть энергия отталкивания, второе – энергия притяжения. При больших значениях φ_δ потенциал не влияет на расклинивающее давление отталкивания, так как с ростом φ_δ увеличивается притяжение противоионов ДЭС к электроду противоположного знака (рис. 2), заряд которого не изменяется [9].

Рассмотрим распределение электрического поля в объеме обрабатываемых стоков. Так как электроды и исследуемое электрическое поле имеют осевую симметрию, применим цилиндрическую систему координат и учтем, что в этом случае поле не зависит от полярного угла γ. Уравнение Лапласа $\Delta^2\varphi = 0, (\vec{E} = -\text{grad}\varphi)$ примет вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

В этом уравнении потенциал φ зависит от r и z $(z = h)$. Используя метод разделения переменных, решение запишем в форме произведения двух функций $\varphi(r, z) = R(r)Z(z)$.

Подставив последнее выражение в уравнение (2) и разделив на RZ, получим:

$$\frac{1}{R}\frac{\partial^2 R}{\partial r^2}+\frac{1}{Rr}\frac{\partial R}{\partial r}=-\frac{1}{Z}\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \qquad (3)$$

Левая часть уравнения (3) зависит от координаты r, а правая – от z. Для электрода круглого сечения линии равного потенциала являются окружностями с центром в начале координат, а поверхности равного потенциала – поверхностями круговых цилиндров. Если совместить с одной из этих поверхностей поверхность электрода круглого сечения с равномерно распределенным зарядом по его длине τ, то на поверхности электрода будет иметь место постоянство потенциала. Пусть функция $\omega = F(z)$ является комплексным потенциалом поля вне электрода. По аналогии с полем уединенного провода круглого сечения аналитическая функция

$$\omega = u + jv = A\ln z + \underline{C},$$

где A – вещественная величина, а $\underline{C} = C_1 + jC_2$.

Обозначив $z = re^{j\gamma}$ получим:

$$\omega = A\ln r + jA(\gamma) + C_1 + jC_2.$$

Тогда $u = A\ln r + C_1$, а $v = A(\gamma) + C_2$. Здесь уравнение линий напряженности электрического поля v = const или r = const. Уравнение линий равного потенциала u = const или γ = const.

Постоянные A и C_2 найдем из условий: $\varphi = C_2 = \varphi_1$ при $\gamma = 0$, $\varphi = A(\gamma) + C_2 = \varphi_2$, когда $\gamma = \beta$. Следовательно $A(\beta) = \varphi_2 - \varphi_1 = U$. Кроме того, $\ln r = 0$ и $C_1 = \varphi_1$ при $r = 1$.

Таким образом, с учетом рассматриваемой конфигурации электродов (рис. 3) будем иметь следующую зависимость напряженности электрического поля:

$$E = \left|\frac{dZ}{dz}\right| = \left|\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{z}\right| = \frac{U}{r_0 + hctg\beta},$$

где U – напряжение на электродах, В;

r_0 – радиус конуса в основании, м;

h – высота конуса, м;

β – угол наклона образующей конуса, град.

При напряжении на электродах 24 В β= 76°, r_0 = = 0,4 м, h = 0,8 м напряженность электрического поля изменяется от 80 до 48 В/м. Для расчетов принята средняя напряженность электрического поля 60 В/м.

К числу основных факторов, определяющих качество очистки при электрохимическом методе, относятся следующие: плотность тока на электродах, объем обрабатываемых сточных вод, материал и конструкция электродов и продолжительность обработки сточных вод. Задача состоит в обеспечении минимума электрической энергии для корректировки заряда частиц загрязнений, электрокоагуляции, электрофлотации, фокусировки удаляемого шлама и ограничении излишнего разложения анода электрокоагулятора.

Авторами были проведены экспериментальные исследования очистки модельных растворов на лабораторной установке, приведенной в источнике [13], с целью определения показателей качества очистки. Электрохимическая очистка модельных стоков проводилась при пропускании через электрокоагулятор различных количеств электричества (от 900 до 2700 Кл и от 900 до 5400 Кл) при средних напряженностях электрического поля 60±2 В/м, плотностях тока на аноде 100±10 А/м^2. Исходная концентрация загрязнений соответствовала показателям, приведенным в источнике [2], и составляла не менее их средних значений: взвешенные вещества – 1300,0±65,0 мг/дм^3; нефтепродукты – 1840,3±18,4 мг/дм^3; сухой остаток – 1433,8±35,8 мг/дм^3; железо (суммарно) – 0,22±0,05 мг/дм^3; $БПК_{полн}$ – 135,6±1,4 мгO_2/дм^3; ХПК – 273,1±14,2 мгO_2/дм^3.

Проводилось два опыта. Первый – с более продолжительной электрохимической очисткой модельных сточных вод без использования камеры электрофлотации (количество электричества в электрокоагуляторе 5400 Кл). Второй – в два раза менее продолжительный, но с одновременным использованием камеры электрофлотации (количество электричества в электрокоагуляторе 2700 Кл).

Методика исследований

Для проведения экспериментов по очистке сточных вод готовился модельный раствор в объеме 18-20 л. Получение эмульсии «масло в воде» проводилось методом диспергирования на устройстве фирмы *IKA* (Германия), обеспечивающего перемешивание системы с регулируемой скоростью в соответствии с инструкцией к прибору. Для получения нужной концентрации нефтепродуктов в растворе проводилось взвешивание на лабораторных весах отработанного моторного масла и воды. Метод предполагает отдельное нагревание как водной, так и масляной фаз до температуры 70-75°С. Подогрев масляной фазы осуществляли в стеклянном стакане на водяной бане. Водная фаза подогревалась в пластмассовой емкости электрическим нагревателем типа ТЭН. Для повышения электропроводности модельного раствора в него добавляли водный раствор поваренной соли с концентрацией 1,2-1,5 г/дм^3, стабилизатор (поверхностно-активное вещество – жидкое мыло – 1,5 мг/дм^3) и частицы песка (2-2,3 г/дм^3). Концентрация взвешенных механических частиц достигалась добавлением в модельный раствор просушенного измельченного на мельнице песка после его взвешивания. Смесь водного раствора и песка встряхивалась ручным способом с 3-кратным перерывом. Стакан с нагретой масляной фазой помещали в устройство для получения эмульсий и закрепляли в нем. Включали перемешивающее устройство (скорость вращения мешалки на этом этапе составляла 200-300 об/мин). Водную среду со взвешенными частицами песка добавляли к масляной фазе тонкой струей при постоянном перемешивании. Перемешивание осуществлялось до тех пор, пока температура смеси не понизилась до 60°С. Затем скорость вращения мешалки увеличивали до 1200 об/мин., продолжали перемешивание в течение 5 мин и проводили дальнейшее охлаждение полученной эмульсии до температуры 35-40°С при перемешивании со скоро-

стью вращения 200-250 об/мин. После 12 часов отстоя брали исходные пробы для измерения показателей качества воды (температура, pH, запах, прозрачность, удельная электрическая проводимость, жесткость общая, сухой остаток, содержание взвешенных веществ, нефтепродуктов (суммарно), железа (суммарно), биохимическое потребление кислорода ($БПК_{полн}$), окисляемость бихроматная (химическое потребление кислорода – ХПК). Анод взвешивали до и после исследования на лабораторных весах, с погрешностью ± 0,03 мг.

Определение показателей загрязненности модельных растворов до и после их очистки проводилось в аналитической лаборатории Белорусского государственного аграрного технического университета при консультировании и технической поддержке лаборатории контроля качества сточных вод коммунального унитарного производственного предприятия «Минскводоканал».

Для измерения температуры, удельной электрической проводимости (УЭП) раствора применяли поверенный кондуктометр КП – 202 с классом точности 2,5. Диапазон измерения температуры прибора – 0…99,9 °С, УЭП – от $2 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ см/м (с датчиками 5М2.329.020 и 5М2.329.021).

Расход электроэнергии при проведении экспериментальных исследований измеряли электронным счетчиком СС-301 с классом точности по активной энергии 0,55. Для регулирования напряжения применялся трехфазный трансформатор АТМН-32-220-75 УХЛ 4, 32А, (50 Гц). Регулирование напряжения 5…220В. Постоянное напряжение получали с помощью трехфазного выпрямителя с двухполупериодной трехфазной мостовой схемой.

Экспериментальные исследования показали, что лучшие результаты очистки по составу загрязнений оказались во втором опыте, с электрофлотацией загрязнений и менее продолжительной обработкой в электрокоагуляторе. Показатели качества очистки соответствовали требованиям [2, 3] (табл. 1).

Наиболее объективно характеризуют качество очистки сточных вод показатели БПК и ХПК (рис. 4, 5).

Таблица 1. Результаты оценки проб по составу загрязнений

№ п/п	Наименование показателей, единица измерения	Результат исследования	Допустимые уровни по **НД1:** СН РБ 3.02.03-2019 **НД2:** МУ 2.1.5.1183-03 (РФ)
1	Водородный показатель pH	Исходная проба **7,23 ± 0,2**	6,5-8,5/6,5-8,5
		Очистка 1 (2700 Кл) **7,68 ± 0,2**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **7,90 ± 0,2**	
2	Взвешенные вещества, мг/дм^3	Исходная проба **1300± 65**	40,0 / 3,0
		Очистка 1 (2700 Кл) **2,6± 0,13**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **2,7± 0,13**	
3	Нефтепродукты, мг/дм^3	Исходная проба **1840,3± 18,4**	15,0 / Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) **2,7± 0,02**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **2,2± 0,02**	
4	Жесткость общая, мг-экв/дм^3	Исходная проба **5,70 ± 0,6**	18,0 / Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) **8,44 ± 0,8**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **10,22 ± 1,2**	
5	Сухой остаток, мг/дм^3	Исходная проба **1433,8 ± 35,8**	1000,0 / Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) **817,5 ± 20,4**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **826,9 ± 20,6**	
6	Железо (Fe суммарно), мг/дм^3	Исходная проба **0,22 ± 0,05**	5 / Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) **0,26 ± 0,05**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **0,70 ± 0,06**	

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Наименование показателей, единица измерения	Результат исследования	Допустимые уровни по **НД1:** СН РБ 3.02.03-2019 **НД2:** МУ 2.1.5.1183-03 (РФ)
7	БПК$_5$, (БПК$_{полн}$) мгО$_2$/дм^3	Исходная проба **104,3 ±1,0** (БПК$_5$) **135,6± 1,4** (БПК$_{полн}$)	80,0(БПК$_{полн}$) / 3,0(БПК$_5$)
		Очистка 1 (2700 Кл) **2,70±0,2** (БПК$_5$) **3,51± 0,3** (БПК$_{полн}$)	
		Очистка 2 (5400 Кл) **2,3 ± 0,2** (БПК$_5$) **3,6 ± 0,3** (БПК$_{полн}$)	
8	ХПК, мгО$_2$/ дм^3	Исходная проба **273,1± 14,0**	Не установлен / 30,0
		Очистка 1 (2700 Кл) **28,5± 1,40**	
		Очистка 2 (5400 Кл) **52,9± 2,60**	
9	Тетраэтилсвинец, мг/ дм^3	Исходная проба **Не обнаружено**	0,001 / Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) **Не обнаружено**	
		Очистка 2 **Не обнаружено**	

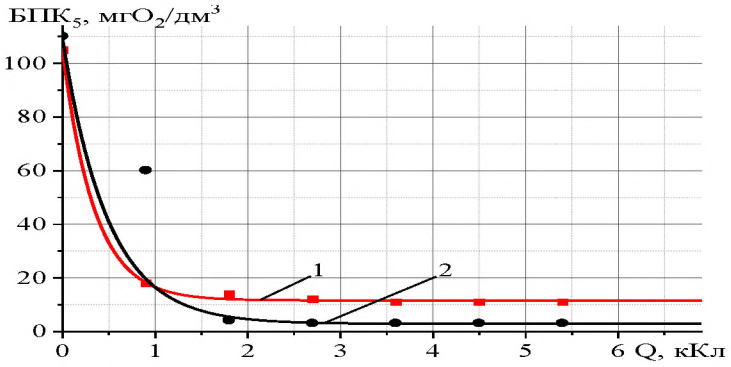

Рисунок 4. Зависимость БПК5 сточных вод от режима очистки: 1 – только в электрокоагуляторе; 2 – очистка в электрофлотокоагуляторе с добавлением в исходный раствор поваренной соли

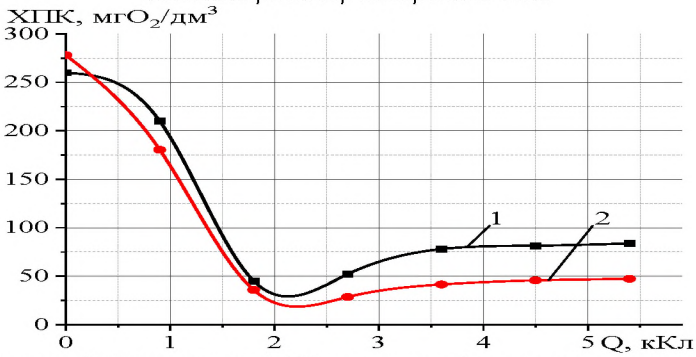

Рисунок 5. Зависимость ХПК сточных вод от режима очистки: 1 – только в электрокоагуляторе; 2 – очистка в электрофлотокоагуляторе с добавлением в исходный раствор поваренной соли

Опыты показали, что при коагуляции загрязнений и растворении анода в дозе 0,52 г/дм^3 (2700 Кл) содержание железа в очищенной воде практически не изменилось по сравнению с исходной его концентрацией, а при растворении электрода свыше 1 г/дм^3 (5400 Кл) – растет и может превышать допустимую норму 5,0 мг/дм^3. Это сопровождается и ростом ХПК.

Добавление в модельные стоки слабого раствора поваренной соли NaCl способствует насыщению очищаемых стоков гипохлоритом натрия, одним из сильных окислителей, а также устранению пассивации электродов за счет образования соляной кислоты, которая реагирует с гидроксидом железа и разрушает образуемую им пленку. Известно, что основные минеральные удобрения содержат соли азотной, соляной, серной, фосфорной и других кислот. Это, например, такие химические соединения как NH_4NO_3, $CO(NH_2)_2$, $Ca(H_2PO_4)_2$, KCl, K_2SO_4, $K_2SO_4 \cdot MgSO_4$ и другие, которые могут присутствовать в сточных водах. Так как при очистке реальных стоков кислоты могут образовываться в процессе электролиза, то в добавлении поваренной соли нет необходимости.

Пузырьки газа, которые образуются при электролизе и электрофлотации, выносят адсорбированные гидроксидом железа загрязнения на поверхность очищаемой воды. С учетом того, что флотируемые частицы обладают магнитными свойствами, то попадая в камеру с неоднородным магнитным полем, меняют траекторию движения из вертикального в спиралевидную, с уменьшением радиуса. Таким образом, загрязнения фокусируются на

поверхности воды в центре воронки, откуда с помощью скребкового или другого устройства удаляются в нефтешлам. Анализ качества сточных вод после очистки в электрофлотокоагуляторе с электрохимическим разложением стального электрода показал достаточно удовлетворительные результаты по показателям «запах» (1 балл) и «мутность» (13 см водяного столба).

Заключение

1. Описан механизм влияния напряженности электрического поля на коагуляцию загрязнений при электролизе сточных вод со стальным анодом.

2. Установлено, что в целях повышения качества электрохимической очистки стоков воды, снижения энергозатрат и расхода металла, этот технологический процесс должен проводиться с учетом концентрации исходных загрязнений. При концентрации нефтепродуктов 1850 мг/дм^3 доза растворения железа не должна превышать 0,52 г/дм^3. При этом обеспечиваются допустимые показатели загрязнений в очищенной воде, пригодной для использования в оборотном водоснабжении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении санитарных норм и правил. Требования к организациям, осуществляющим сельскохозяйственную деятельность: постановление Министерства здравоохранения Респ. Беларусь от 08 февраля 2016 г. № 16. – Введены с изм. 23.02.2016 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21630713 (дата обращения: 03.04.2025)

2. Об утверждении и введении в действие изменения к строительным нормам СН 3.02.03-2019 «Станции технического обслуживания транспортных средств. Гаражи-стоянки автомобилей»: постановление Министерства архитектуры и строительства Респ. Бларусь от 17 ноября 2022 г. № 94. – Введены с изм. 02.04.2023 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339379 (дата обращения: 04.04.2025).

3. Санитарно-эпидемиологический надзор за использованием воды в системах технического водоснабжения промышленных предприятий: МУ 2.1.5.1183-03; утв. гл. гос. санитарным врачом Российской Федерации 11 января 2003 г. – Введены 01.03.2003. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 20 с.

4. Каратаев, О.Р. Очистка сточных вод электрохимическими методами / О.Р. Каратаев, З.Р. Шамсутдинова, И.И. Хафизов // Вестник технологического университета (Казань). – 2015. – Т. 18. – № 22. – С. 21-23.

5. Экологические проблемы эксплуатации установок мойки автомобилей и пути их решения / И.А. Нечаев, А.Н. Белевцев, В.И. Жаворонкова [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 3. – С. 19-27.

6. Баранов, В.Я. Электрокинетические явления / В.Я. Баранов, В.И. Фролов. – М.: РГУ нефти и газа, 2002. – С. 52.

7. Савицкая, Т.А. Колоидная химия: строение двойного электрического слоя, получение и устойчивость дисперсных систем / Т.А. Савицкая, Д.А. Котиков, Т.А. Шичкова. – Минск: БГУ, 2011. – 82 с.

8. Соколов, Л.И. Ресурсосберегающая технология очистки маслоэмульсионных сточных вод: монография / Л.И. Соколов. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 74 с.

9. Грановский, М.Г. Электрообработка жидкостей / М.Г. Грановский, И.С. Лавров, О.В. Смирнов; под ред. И.С. Лаврова. – Ленинград: «Химия», 1976. – 216 с.

10. Hogg, R. Mutual coagulation of colloidal dispersions / R. Hogg, T.W. Healy and D.W. Fuerstenau // Trans. Faraday Soc. – 1966. – Vol. 62. – P. 1638.

11. Holt, P.K. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology / P.K. Holt, G.W. Barton, C.A. Mitchell // ELSEVIER Chemosphere, 2005. – № 59. – P. 355-367.

12. Хрипунова, О.С. Комбинированный метод с использованием химической и электрокоагуляции для очистки сточных вод при производстве красок на водной основе / О.С. Хрипунова, Ю.Е. Зевацкий, И.В. Кочуров // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2017. –№ 3. – С. 62-69.

13. 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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.04.2025