

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ 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

А.П. Мириленко,

доцент каф. моделирования и проектирования БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье предложен комбинированный многофункциональный аппарат очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники с использованием электрохимической коагуляции и электромагнитной флотации загрязнений. На основе планирования эксперимента осуществлено математическое моделирование процесса очистки по удельным энергетическим затратам и показателю снижения наиболее трудноудаляемых углеводородных включений. Определены оптимальные технологические режимы электрообработки стоков в зонах электрохимической коагуляции, электрической и магнитной флотации. По допустимым показателям загрязнений очищенная вода пригодна для систем оборотного технического водоснабжения.

Ключевые слова: сточные воды, загрязнения, электрохимическая коагуляция, электро- и магнитная флотация, режимы электрообработки.

The article proposes a combined multifunctional wastewater treatment unit for external washing of agricultural machinery using electrochemical coagulation and electromagnetic flotation of contaminations. Based on the experimental planning, mathematical modeling of the wastewater treatment process was carried out in terms of specific energy costs and reduction of the most difficult-to-remove hydrocarbon inclusions. Optimal technological modes of electrical wastewater treatment in the zones of electrochemical coagulation, electric and magnetic flotation have been determined. According to acceptable pollution indicators, purified water is suitable for recycling water supply systems.

Key words: wastewater, contaminations, electrochemical coagulation, electro- and magnetic flotation, electrical treatment modes.

Введение

Машинные дворы сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь потребляют значительные объемы воды на наружную мойку машин и техники. Неочищенные сточные воды постов мойки представляют угрозу гидросфере и другим объектам природопользования. Известен ряд устройств и способов очистки сточных вод, использующих механические, химические, электрофизические и другие методы их обезвреживания.

Совершенствованию установок очистки сточных вод электрофизическими методами с сочетанием различных функций в одном аппарате посвятили свои работы ученые Б.С. Ксенофонтов, Б.В. Дерягин, Е.В. Алексеев, В.С. Пашинин, С.С. Душкин и др. [1-5].

Одной из трудно решаемых проблем является снижение концентрации загрязнений сточных вод до

допустимых показателей, установленных для технической воды. В этом случае контролируются pH, запах, температура, общая жесткость воды, содержание взвешенных веществ, нефтепродуктов, железа, сухого остатка, тетраэтилсвинца, биохимическое (БПК₅) и химическое потребление кислорода (ХПК), санитарно-гигиеническое соответствие. В процессе электрохимической очистки сточных вод ряд перечисленных показателей обеспечивается легко. Однако такие параметры, как ХПК и содержание железа могут при определенных режимах электрообработки не соответствовать требованиям.

Цель работы – определить оптимальные электро-технологические режимы электрообработки сточных вод наружной мойки для снижения концентрации загрязнений до показателей качества, позволяющих использовать ее в системе оборотного технического водоснабжения.

Основная часть

В Белорусском государственном аграрном техническом университете разработано устройство очистки сточных вод и получен патент Республики Беларусь на изобретение №21229 «Трехпродуктовый гидроциклон для очистки сточных вод». В основу устройства положены электрохимическая очистка сточных вод в процессе их электролиза и разложения стального анода, электромагнитная флотация загрязнений и их удаление с помощью скребкового или другого устройства.

Установка очистки представляет собой комбинированный многофункциональный аппарат, включающий электрохимическую коагуляцию и электромагнитную флотацию загрязнений. Устройство включается в технологический процесс наружной мойки сельскохозяйственной техники, схема которого представлена на рисунке 1.

Вода с моечной площадки 1, стекает в резервуар 3, который оборудован перегородкой 4 для отделения песка, а затем насосом 5 подается в гидроциклон 6. В гидроциклоне за счет центробежных сил оставшиеся механические примеси выпадают в осадок. Далее вода поступает в зону электрохимической коагуляции. Здесь под действием электрического тока, протекающего между электродами, происходит разложение стального анода и образование хлорида железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Хлорное железо вступает в реакцию со щелочной средой, накапливаемой у катода с образованием хлопьев гидроксида железа (III). Хлопья на своей поверхности адсорбируют частицы эмульсии нефтепродуктов и других взвешенных веществ.

Выделяющиеся на катоде молекулы водорода и на аноде – кислорода захватывают хлопья и выносят их в зону электрофлотации 8. Здесь за счет сетчатого катода (увеличена кривизна его поверхности) более интенсивно выделяется водород и усиливает флотацию загрязнений. В зоне магнитной флотации 9 под

воздействием неоднородного магнитного поля траектория движения флотокомплекса (частицы загрязнения и присоединившиеся к ним пузырьки электролитических газов) меняется из-за различной магнитной восприимчивости жидкой фазы дисперсной среды и частиц загрязнений. Взвешенные частицы обладают магнитным моментом, так как содержат соединения железа. В процессе электрохимической коагуляции образуется не только гидроксид железа, но и оксиды железа, такие как, например, магнетит. Магнетит является ферромагнитным материалом и обладает значительными магнитными свойствами. По мере увеличения напряженности магнитного поля на частицы действует сила в направлении увеличения магнитной индукции. Таким образом, флотация загрязнений на поверхность происходит с их концентрацией в центре, если катушка индуктивности 10 выполнена в виде конуса, с уменьшением радиуса по направлению движения частиц. Происходит разделение потока на чистую воду и загрязнители. В зоне магнитной флотации предусмотрен отвод нефтешлама. Очищенная вода направляется в резервуар чистой воды 12, а флотошлам – в специальную емкость. Очищенная вода из резервуара 12 моечной машиной 2 используется повторно. Для устранения перелива воды через воздушное отверстие отвода электролитических газов предусмотрен датчик уровня 11, который регулирует работу насоса 5. Напряжение источника питания электромагнитной установки – 24 В.

С целью снижения электропотребления и уменьшения нагрева сточных вод [5, 6] в зоне электрохимической коагуляции катод размещен под углом к аноду, что создает неоднородное электрическое поле. В зоне магнитной флотации также создается неоднородное магнитное поле. Качество очистки сточной воды зависит от производительности установки (скорости движения жидкости в электромагнитном поле), напряженности электрического и магнитного поля, плотности тока на электродах и других

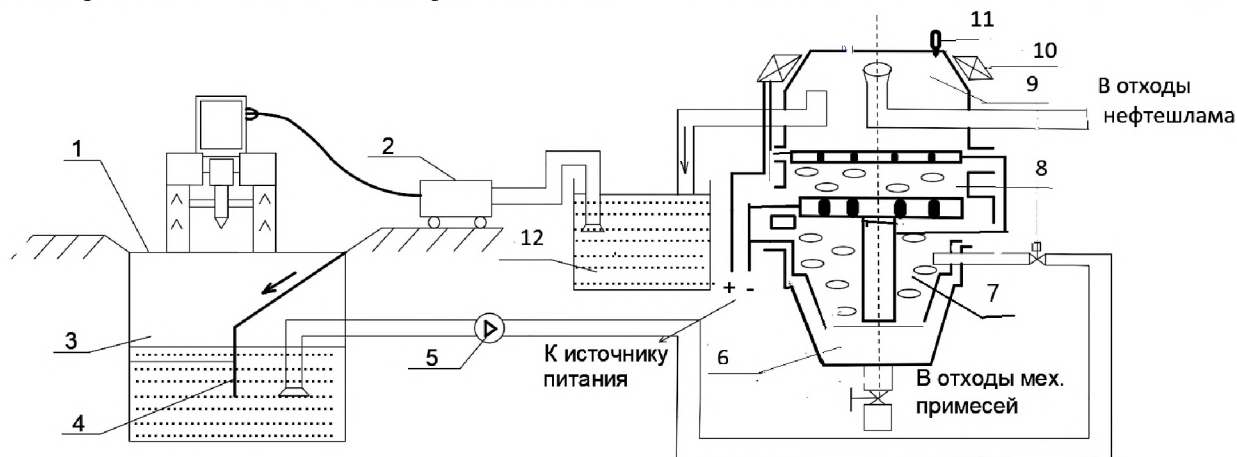


Рисунок 1. Технологическая схема наружной мойки сельскохозяйственной техники с очисткой сточных вод в электромагнитной установке: 1 – моечная площадка; 2 – моечная машина; 3 – резервуар сбора сточных вод; 4 – перегородка; 5 – насос; 6 – гидроциклон; 7 – зона электрохимической коагуляции; 8 – зона электрофлотации; 9 – зона магнитной флотации; 10 – коническая индуктивная катушка; 11 – датчик уровня; 12 – резервуар чистой воды

факторов. В источниках [7, 8] показано, что образующийся в процессе электролиза сточных вод гипохлорит натрия и другие окислители подавляют патогенную микрофлору и обеспечивают безопасные санитарно-гигиенические показатели воды.

Ранее, в источнике [9], обоснованы факторы, влияющие на энергетические затраты при очистке сточных вод от нефтепродуктов и конечную концентрацию загрязнений. Установлено, что процесс очистки, физическая модель которого реализована на лабораторной установке, зависит от следующих факторов:

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.

В целях снижения размерности факторного пространства на основе экспертных оценок проведено ранжирование названных факторов по степени их влияния на качество очистки. С учетом ранжирования и 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 Statistika версии 10.0. Для этого сформирован трехуровневый план Бокса-Бенкена с добавлением дополнительных опытов в нулевом уровне для обеспечения более высокой предсказательной точности математической модели. По составленной матрице были проведены эксперименты с трехкратной повторностью. Интервалы варьирования управляющих факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни варьирования управляющих факторов

Уровни варьирования	Факторы		
	Исходная концентрация загрязнений, мг/дм ³	Производительность очистки, дм ³ /с	Плотность тока, А/м ²
	X_1	X_2	X_3
Основной (0)	2000	0,5	100
Верхний (+1)	2200	0,7	150
Нижний (-1)	1800	0,3	50
Интервал варьирования	200	0,2	50

Для аналитического описания удельных энергетических затрат на очистку стоков воды от нефтепродуктов Y_1 и их концентрации после очистки Y_2 выбраны математические модели второго порядка, включающие произведение между факторами

$$Y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (2)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}, b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты регрессии; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов, соответственно, исходная концентрация нефтепродуктов в стоках, производительность установки, плотность тока.

В качестве исходных данных были использованы результаты 45-ти экспериментов, в которых значение факторов варьировалось в соответствии с матрицей предложенного плана их проведения. При расчетах значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента, и пошагово исключались сомножители, не являющиеся статистически значимыми коэффициентами. В итоге получена математическая модель, включающая первую степень переменной «уровень исходного загрязнения» и вторую степень переменной – «плотность тока». Пересчитанное для исходных натуральных показателей уравнение регрессии имеет вид:

$$Y_1 = 1,745 + 0,000625X_1 - 0,01X_3 + 0,00005X_3^2. \quad (3)$$

Подтверждена адекватность модели (3) путем использования анализа ANOVA и критерия Фишера. Поверхность отклика удельного расхода электроэнергии от исходной концентрации загрязнений и плотности тока представлена на рисунке 2.

Получена также математическая модель Y_2 – концентрация загрязнений в очищенной воде, мг/дм³. При составлении этой математической модели оказались значимы только коэффициенты при $x_1, x_1^2x_2$ и x_3^2 . После оценки уровня значимости коэффициентов регрессии с помощью критерия Стьюдента и оценки адекватности модели по критерию Фишера получено пересчитанное уравнение для исходных показателей в следующем виде:

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

Поверхности отклика конечной концентрации загрязнений с учетом варьируемых уровней показателей «производительность установки X_2 » и «плотность тока X_3 » при фиксированных значениях исходной концентрации загрязнений представлены на рисунках 3-5.

Полученная математическая модель удельных затрат электроэнергии на очистку сточных вод имеет выпуклую поверхность, минимумов нет. 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 минимальных показателей – менее 3 мг/дм³. На практике исходная концентрация загрязнений может колебаться в широких пределах, обычно она составляет 300-700 и не превышает 1000 мг/дм³. При концентрации исходных загрязнений (1000 мг/дм³) поверхность отклика конечной концентрации загрязнений представлена на рисунке 6.

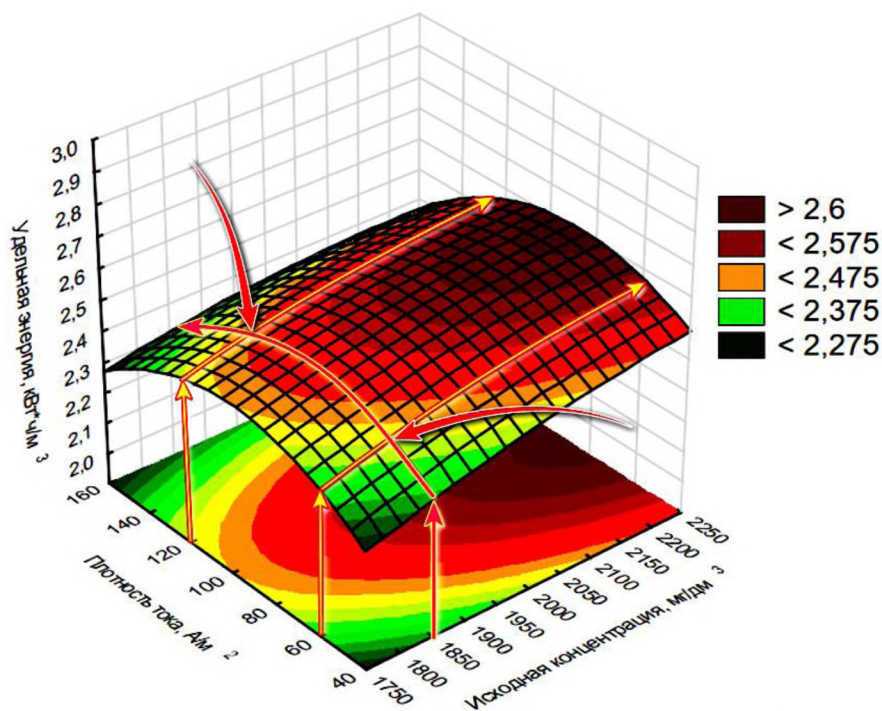


Рисунок 2. Поверхность отклика удельных затрат энергии от исходной концентрации загрязнений и плотности тока на аноде

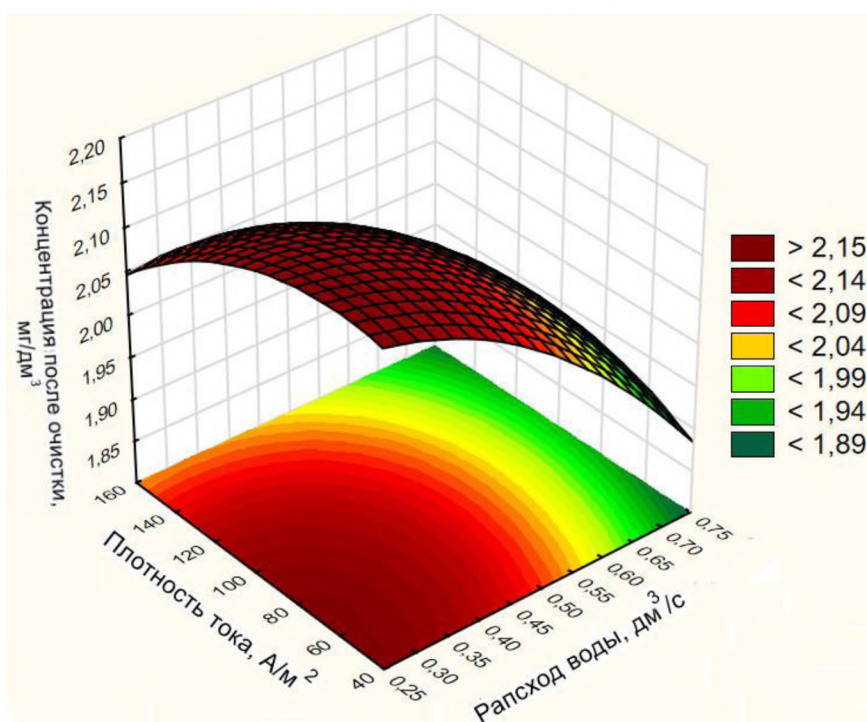


Рисунок 3. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 1800 мг/дм³

Как показывает поверхность отклика на рис. 6, при малой производительности очистки (0,3 дм³/с) конечная концентрация загрязнений превышает 3,6 мг/дм³. Это можно объяснить тем, что при низкой производи-

тельности очистки сточные воды дольше подвергаются электрохимической коагуляции. Дисперсная среда перенасыщается коагулянтom – гидроксидом железа, а это, в свою очередь,

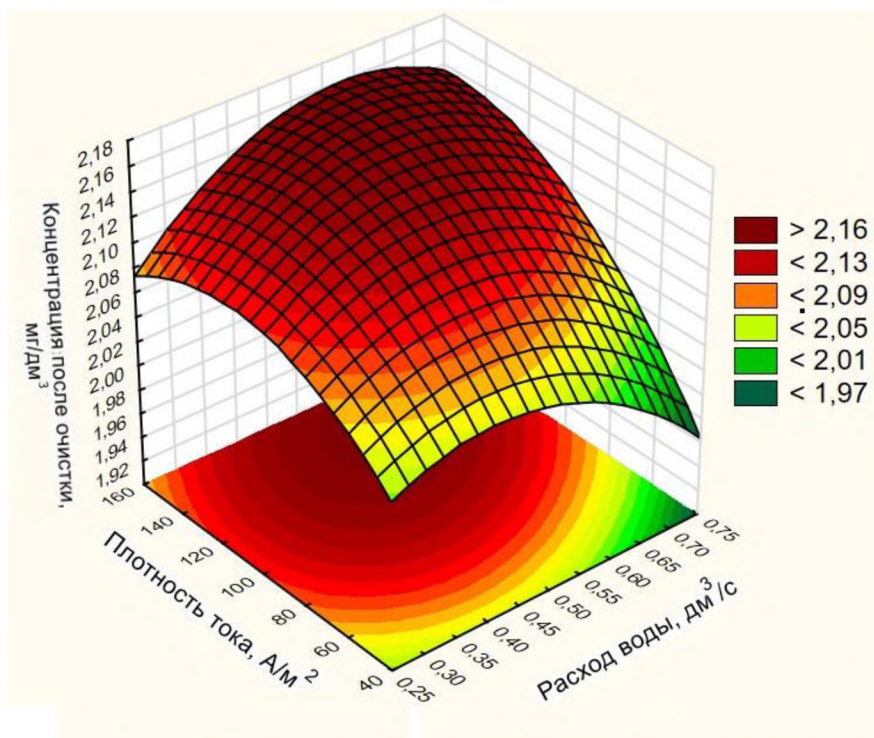


Рисунок 4. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 2000 мг/дм³

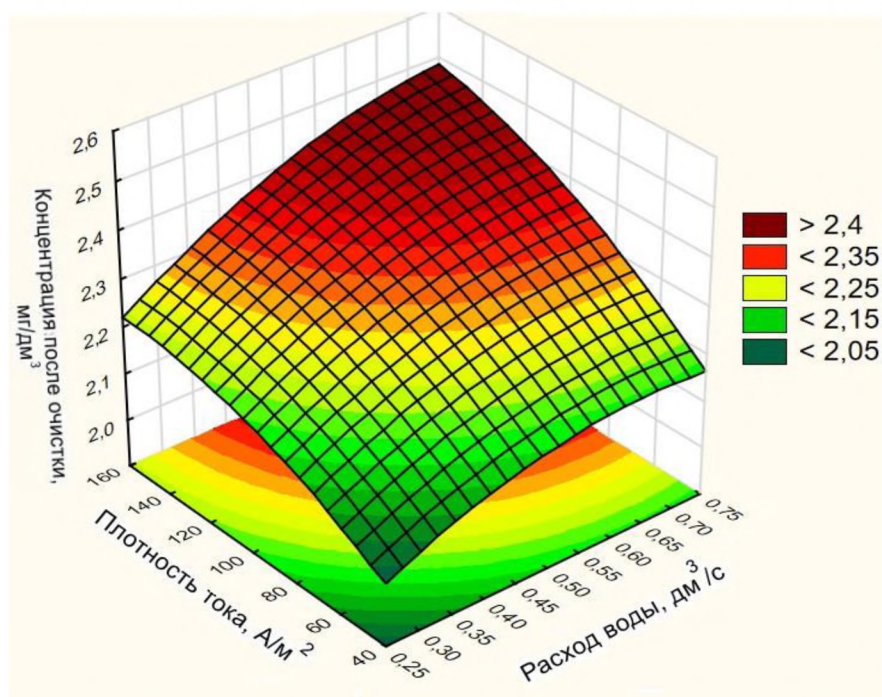


Рисунок 5. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 2200 мг/дм³

приводит к обратному процессу – пептизации. Крупные хлопья начинают распадаться на множество мелких. Это явление хорошо известно в коллоидной химии. Проведенные исследования

по электрофлотации загрязнений показали, что при высокой плотности тока (более 120 А/м²) начинается бурное выделение пузырьков электролитических газов, которые не только флотируют хлопья загрязнений, но и

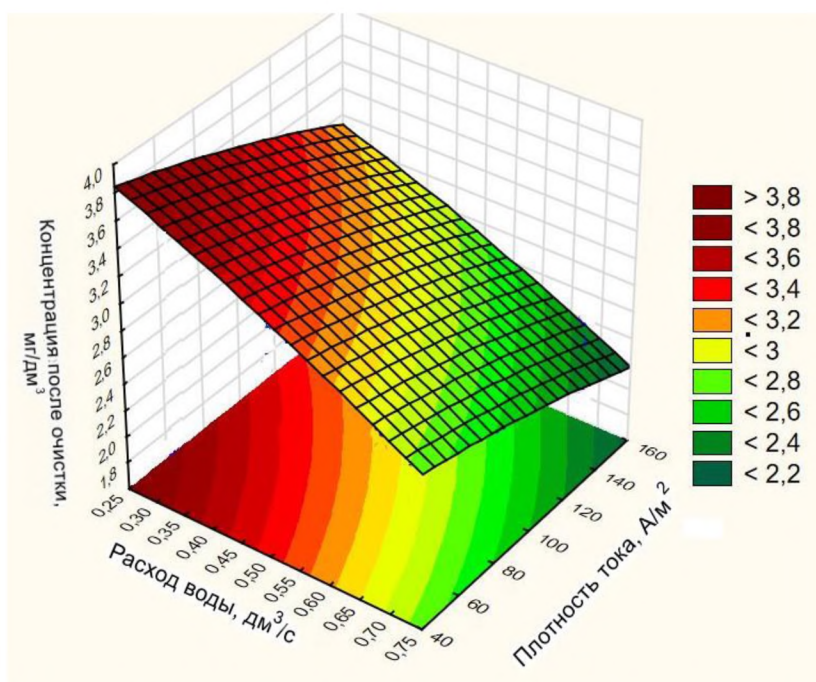


Рисунок 6. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 1000 мг/дм³

разрушают их. Наступает пептизация. Также установлено [10], что при электрообработке сточных вод с увеличением удельного количества электричества свыше 150 Кл/дм³ (плотность тока более 120 А/м²) растут показатели БПК и ХПК в очищенной воде (биохимическое и химическое потребление кислорода).

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

$$\begin{cases} \min \Theta(c_1, g, j) = 1,755 + 6,25 \cdot 10^{-4} c_1 - 0,01j + \\ + 5,0 \cdot 10^{-5} j^2; \\ c_1 = c_0 \in (700; 1850); \\ c_2 = 4,1 - 9,1 \cdot 10^{-4} c_1 - 8,17g - 2,67 \cdot 10^{-3} j + \\ + 4,1 \cdot 10^{-3} c_1 g + 1,33 \cdot 10^{-5} j^2; \\ c_2 \leq 3; \\ 60 \leq j \leq 120; \\ 0,4 \leq g \leq 0,7, \end{cases} \quad (5)$$

где $\min \Theta$ – целевая функция для нахождения минимального удельного потребления электроэнергии на очистку сточных вод, кВтч/м³;

c_1 – область определения исходного параметра концентрации, мг/дм³.

Исходя из требований по допустимой концентрации нефтепродуктов, приняты ограничения по $c_2 \leq 3$ мг/дм³ (концентрация загрязнений сточных вод нефтепродуктами после очистки). Из-за возможного

наступления пептизации коагулянта введены ограничения по наибольшей плотности тока и образованию допустимой дозы коагулянта – по наименьшей, т.е. $60 \leq j \leq 120$ А/м² (рис. 2), а также по производительности очистки по показателям предельно допустимой концентрации загрязнений после очистки – $0,4 \leq g \leq 0,7$ дм³/с (рис. 6, 7).

Целевая функция (5) задана полиномом второго порядка, поэтому у нее могут существовать только глобальные экстремумы при отсутствии локальных. Для решения данной задачи применяли 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 ее можно отобразить как трехмерную поверхность и найти экстремум визуально. С учетом ограничений наблюдаем локальный минимум на границах области при значении плотности тока 60 А/м². Проверка по уравнению (3) регрессии для исходной концентрации до 1850 мг/дм³ показывает, что минимум удельных энергозатрат соответствует этому значению плотности тока и составляет 2,42 кВтч/м³ (рис. 2). Проверка ограничений для плотности тока 60 А/м² показывает, что при этом соответствуют два локальных минимума конечной концентрации загрязнений, с производительностью очистки 0,4 и 0,7 дм³/с и выполняется условие, когда $c_2 \leq 3$ мг/дм³. Поэтому целесообразно выбрать параметр с большей производительностью. Поверхность отклика удельных энергозатрат с оптимальными технологическими параметрами обработки сточной воды представлена на рисунке 7.

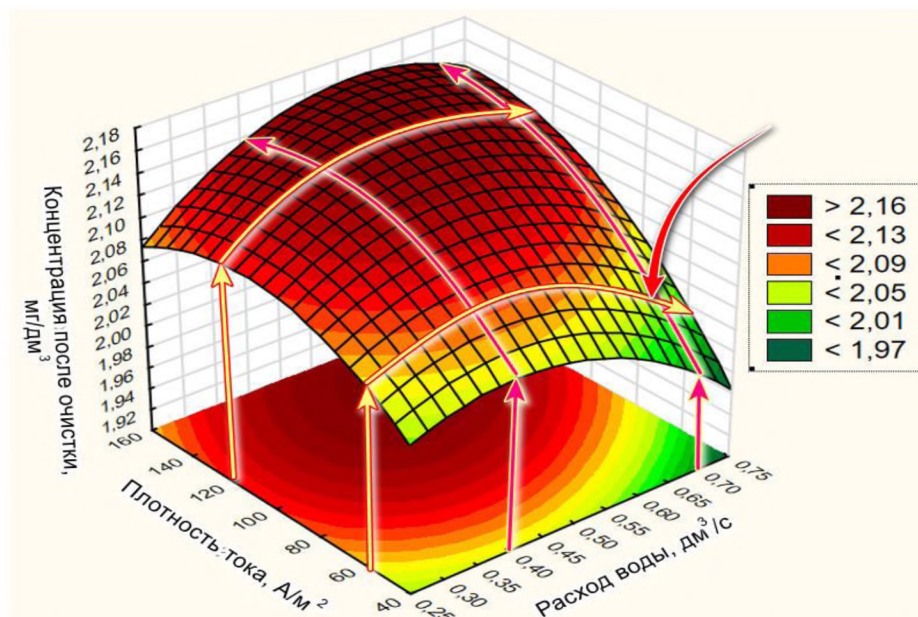


Рисунок 7. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений при оптимальных значениях плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений до 1850 мг/дм^3

Заключение

1. На основе экспериментальных данных получены математические модели зависимости удельных энергетических затрат очистки сточных вод от нефтепродуктов при варьировании показателей их исходной концентрации и плотности тока, а также конечной концентрации загрязнений при тех же факторах и производительности очистки. Установлено, что для минимизации потребления электроэнергии при исходной концентрации загрязнений от 700 до 1850 мг/дм^3 целесообразно выбрать следующие технологические параметры: плотность тока – 60 А/м^2 ; производительность очистки – $0,7 \text{ дм}^3/\text{с}$; напряженность электрического поля и напряженность магнитного поля – в среднем 600 В/м и 10 кА/м соответственно.

2. Приведенные технологические параметры могут быть положены в основу инженерного расчета электромагнитной установки по конструктивным размерам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ксенофонтов, Б.С. Флотационная очистка жиро-содержащих сточных вод / Л.А. Дулина, Б.С. Ксенофонтов, М.Н. Моисеев // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 12. – С. 19-22.
2. Дерягин, Б.В. Микрофлотация / Б.В. Дерягин и [и др.]. – М.: Химия, 1986. – 112 с.
3. Алексеев, Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией: монография / Е.В. Алексеев. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 136 с.
4. Пошилин, В.С. Блочно-модульная установка для очистки сточных вод / В.С. Пошилин, М.А. Коваленко // Мир транспорта. – 2014. – № 2. – С. 168-179.

5. Душкин, С.С. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография / С.С. Душкин, А.Н. Коваленко, М.В. Дектябрь, Т.А. Шевченко. – Х.: ХНАГУ, 2014. – 146 с.

6. 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.

7. 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. аграрн. техн. ун-т; под ред. М.А. Прищепова. – Минск: БГАТУ, 2007. – С. 246-249.

8. Бойко, М.А. Повышение степени очистки и обеззараживания стоков постов мойки автотракторной техники электротехнологическими методами / М.А. Бойко // Агропанорама. – 2024. – № 1. – С. 29-33.

9. 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.

10. 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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.07.2025