

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-436-442>

УДК 628.31:004

Оптимизация процесса очистки сточных вод постов мойки автотракторной техники по энергетическим затратам

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Крутов¹⁾, М. М. Дечко¹⁾,
инж. М. А. Бойко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

©Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассмотрен процесс очистки нефтесодержащих стоков с применением электрокоагуляции, электрофлотации и электромагнитного гидроциклона, реализованный на лабораторной установке (патент Республики Беларусь на изобретение № 21229). Исследования проводились с целью оптимизации удельных энергозатрат процесса очистки стоков от топливно-смазочных веществ. Методами исследования являлись обзор литературы, сравнительный анализ, эксперимент, математическое моделирование. Содержание нефтепродуктов в сточных водах до и после очистки оценивалось в аналитической лаборатории Белорусского государственного аграрного технического университета по стандартным методикам. Выполнена очистка нефтесодержащих стоков на лабораторной установке с помощью метода электрофлотокоагуляции с удалением всплывшего шлама в электромагнитном гидроциклоне. Данный способ очистки позволяет повысить степень обеззараживания воды, обеспечивает замкнутое водоснабжение, рациональное использование водных ресурсов, снижение вредного воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду. Проведено планирование эксперимента. Реализован трехуровневый план Бокса – Бенкена. Решена задача оптимизации процесса очистки по энергетическим затратам, не ухудшая требуемых показателей концентрации нефтепродуктов в воде после очистки. Получены математические модели и определены оптимальные режимы очистки при наименьших удельных энергетических затратах и достаточно высокой степени очистки. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. Установлено, что на предложенной установке степень очистки стоков постов мойки автотракторной техники можно достичь при ее производительности $G = 0,7$ л/с, плотности тока $j = 150$ А/м². Степень очистки, определяемая отношением концентраций загрязнителя до и после очистки, составляет 99,9 %. Результаты могут быть использованы при реализации микропроцессорного управления режимом очистки, приняв в качестве управляющего воздействия такие факторы, как исходная концентрация загрязнений, производительность установки, плотность тока электрофлотокоагулятора.

Ключевые слова: электрокоагуляция, электрофлотация, электромагнитный гидроциклон, контроллер, планирование эксперимента, оптимизация

Для цитирования: 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. Т. 18, № 5. С. 436–442. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-436-442>

Optimization of Wastewater Treatment Process on Energy Costs at Truck and Tractor Washing Posts

A. V. Krutau¹⁾, M. M. Dechko¹⁾, M. A. Boika¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers a process pertaining to purification of oily effluents while using electrocoagulation, electro-flotation and an electromagnetic hydro-cyclone, implemented with the help of a laboratory unit (Patent of the Republic of Belarus)

Адрес для переписки
Крутов Анатолий Викторович
Белорусский государственный аграрный
технический университет
просп. Независимости, 99
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 373-11-53
an8737@yandex.ru

Address for correspondence
Krutau Anatoli V.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99 Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 373-11-53
an8737@yandex.ru

for the invention No 21229). The investigations have been carried out with the purpose to optimize specific energy consumption for the process of cleaning fuel and lubricants effluents. The following investigation methods have been applied – a literature review, a comparative analysis, an experiment execution, a mathematical modeling. Content of oil products in wastewater before and after treatment has been evaluated in the analytical laboratory of the Belarusian State Agrarian Technical University in accordance with standard methods. Purification of the oily effluents has been made with the help of a laboratory unit while using electroflotocoagulation method with removal of floated sludge in an electromagnetic hydrocyclone. This cleaning method makes it possible to increase a degree of water disinfection, provides a closed water supply, rational use of water resources, reduction of harmful effects of pollutants on the environment. An experimental design technique has been worked out and a three-level Box – Behnken design has been implemented in the paper. The problem concerning optimization of the purification process on energy costs has been solved without worsening the required concentration indices of petroleum products in water after treatment. Mathematical models have been obtained and optimal purification modes have been determined at the lowest specific energy costs and with sufficiently high degree of purification. Significance of regression coefficients has been estimated by Student criterion. It has been established that while using the proposed unit it is possible to obtain a degree of wastewater purification at automotive equipment washing stations with its performance $G = 0.7$ l/s, current density $j = 150$ A/m². The degree of purification, determined by ratio of pollutant concentrations before and after purification, is up to 99.9 %. The results can be used in implementation of microprocessor control of cleaning mode while taking an initial concentration of pollution, unit capability, current density of an electroflotocoagulator as control action factors.

Keywords: electrocoagulation, electroflotation, electromagnetic hydrocyclone, controller, experimental design technique, optimization

For citation: Krutau A. V., Dechko M. M., Boika M. A. (2019) Optimization of Wastewater Treatment Process on Energy Costs at Truck and Tractor Washing Posts. *Science and Technology*, 18 (5), 436–442. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-436-442> (in Russian)

Введение

В сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь на мойку автотракторной техники и различных сельхозмашин затрачиваются значительные объемы воды. Кроме того, образованные при этом сточные воды содержат различные минеральные загрязнения и особенно нефтепродукты в дозах, превышающих предельно допустимые показатели, а также синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ).

В стоках постов мойки автотракторной техники и сельскохозяйственных машин присутствуют нефтепродукты, поверхностно-активные вещества и другие загрязнители, относящиеся к числу наиболее опасных для окружающей среды. Исследованиями, проведенными ранее на кафедре электротехники БГАТУ [1, 2], а также в литературных источниках [3–6] установлено, что процесс очистки сточных вод от нефтепродуктов и СПАВ может быть эффективно реализован электрохимическим воздействием, управляемым рядом факторов: физико-химическими, электрическими и гидродинамическими. Одним из возможных технических решений, реализующих процесс очистки нефтесодержащих стоков, является электрофлотокоагуляция с удалением всплывшего шлама в электромагнитном гидроциклоне. Этот метод очистки позволяет повысить степень обеззараживания воды и обеспечить замкнутое водоснабжение, рациональное использование водных ресурсов, снижение вредного воздействия загрязняющих веществ на окру-

жающую среду. Очистка путем электрокоагуляции и электрофлотации хорошо исследована в ряде работ, например в [5, 6]. Однако в них не рассматривается расход энергоресурсов. Авторы статьи ставили задачу добиться меньших энергозатрат при очистке, не снижая качества процесса.

Основная часть

Задача оптимизации процесса очистки сточных вод включает построение физической и математической моделей процесса и определение оптимальных значений управляющих факторов, обеспечивающих минимальные энергетические затраты на единицу объема очистки сточных вод при требуемом уровне качества очистки [7–9].

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке (рис. 1а), состоящей из насоса, выпрямительного блока, электрокоагулятора, электрофлотатора, электромагнитного гидроциклона, емкости для модельного состава загрязненных и очищенных вод, соединительных шлангов, средства контроля технологического процесса очистки. Для контроля и управления процессом очистки использовались следующие приборы: вольтметры универсальные В7-65, В7-58/2, шунты, кондуктометр КП-202, мультиметр цифровой УТВ 1818, прошедшие в установленном порядке государственную поверку, программируемый контроллер Simatic S7-1200, состоящий из центрального процессора, блока питания, модуля ввода-вывода дискретных сигналов, модуля

ввода-вывода аналоговых сигналов, сенсорной панели оператора КТР700 Basic PN (рис. 1б). Схему составляли согласно [3–6]. В качестве сточных вод использовались модельные водные стоки с содержанием нефтепродуктов в них от 1800 до 2200 мг/л.

Технический уровень процесса очистки сточных вод определяется двумя важнейшими параметрами: качеством очистки (C , мг/л), характеризующим остаточным содержанием нефтепродуктов в сточных водах, и удельными энергозатратами (\mathcal{E}_s , Дж/м³). В используемой для мойки грузовых автомобилей осветленной производственной сточной воде концентрация механических примесей не должна превышать 70 мг/л, для мойки легковых автомобилей и автобусов – 40 мг/л, концентрация нефтепродуктов – соответственно 20 и 15 мг/л [7].

Содержание нефтепродуктов в сточных водах до и после очистки оценивалось в аналитической лаборатории университета по стандартным методикам (руководство по химическому анализу вод). Результаты проведенных исследований отобранных проб оформлялись протоколами.

Полная удельная энергоемкость очистки состоит из прямых и овеществленных затрат, отнесенных к годовому объему очистки стоков

$$\mathcal{E}_s = \frac{1}{Q} \sum (\mathcal{E}_{pri} + \mathcal{E}_{ovi}),$$

где Q – годовой объем очистки стоков, м³; \mathcal{E}_{pri} , \mathcal{E}_{ovi} – удельные прямые и овеществленные затраты i -го вида, МДж (кВт·ч).

Известно определение удельных прямых и овеществленных энергозатрат по методике [10]. К прямым энергозатратам относятся затраты, связанные с потреблением установкой электроэнергии на очистку стоков. К овеществленным – затраты на изготовление, хранение, обслуживание установки, сбор и подачу стоков на очистку, которые определяются с учетом энергетических эквивалентов.

Однако возможности энергетического анализа по указанной выше методике ограничиваются тем, что в области очистки стоков сельскохозяйственного производства, во-первых, отсутствует региональный или общенациональный банк данных, позволяющий автоматизировать поиск и накопление информации по энергоресурсосбережению, особенно овеществленных энергозатрат. Во-вторых, затраты энергии и ресурсов частично или полностью окупаются снижением рисков нанесения ущерба гидросфере.

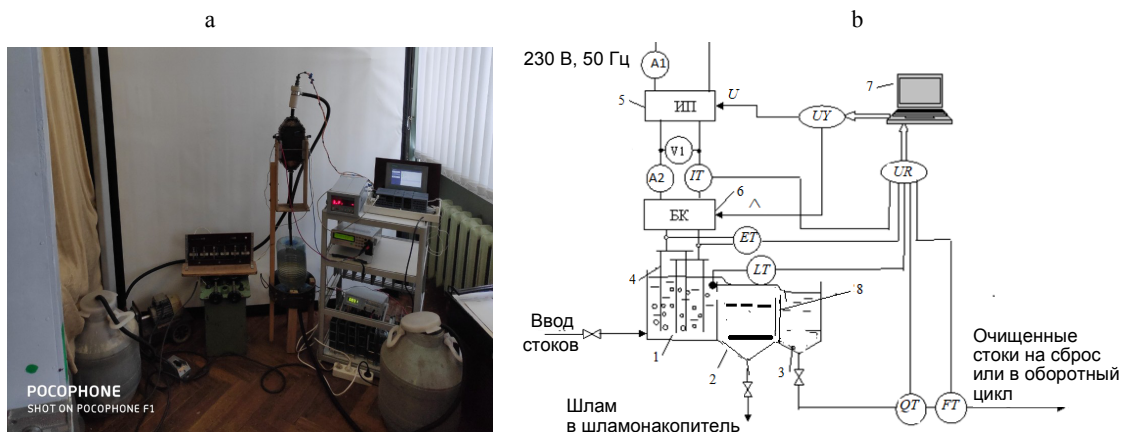


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментальной установки: 1 – электрокоагулятор; 2 – электрофлотатор со шламонакопителем; 3 – электромагнитный гидроциклон; 4 – электрод; 5 – источник питания (ИП); 6 – блок контроллера (БК); 7 – компьютер; 8 – канал для отвода всплывающего шлама; А1, А2 – амперметр; V1 – вольтметр; IT – датчик тока; ET – делитель напряжения; LT – датчик уровня; QT – датчик электропроводности (кондуктометр); FT – расходомер; UR – многоканальный аналого-цифровой преобразователь; UY – многоканальный цифроаналоговый преобразователь; U – сигнал управления; Λ – логический сигнал управления БК

Fig. 1. Appearance (a) and scheme (b) of experimental unit: 1 – electro-coagulator; 2 – electroflotator with sludge collector; 3 – electromagnetic hydrocyclone; 4 – electrodes; 5 – power source (PS); 6 – controller unit (CU); 7 – computer; 8 – channel for removal of floated sludge; A1, A2 – ammeters; V1 – voltmeter; IT – current sensor; ET – voltage divider; LT – level sensor; QT – conductivity sensor (conductivity meter); FT – flow meter; UR – multi-channel analog-to-digital converter; UY – multi-channel digital-to-analog converter; U – control signal; Λ – logic control signal CU

Поэтому для оптимизации энергозатрат на очистку использовали статистическую обработку полученных в ходе экспериментов данных качества обезвреживания стоков и прямых удельных затрат электроэнергии [11]. С учетом того, что материалоемкость установки относительно небольшая и применяется для решения экологических проблем и снижения расхода водных ресурсов (замкнутая технология подачи воды на мойку), оштествленными затратами пренебрегли.

На прямые удельные энергозатраты будут влиять следующие факторы:

- исходная загрязненность сточных вод нефтепродуктами и СПАВ, г/м³ (от этого зависит продолжительность очистки);
- производительность установки по очистке стоков, м³/ч;
- напряженность электрического поля в электрофлотокоагуляторе, В/м;
- плотность тока электрокоагулятора, А/м²;
- напряженность магнитного поля в электромагнитном циклоне, А/м, и др.

Рассчитать приведенные удельные затраты (Вт·ч/м³) можно по следующей формуле:

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

где j – плотность тока электрофлотокоагулятора, А/м²; E – напряженность электрического поля в электрофлотокоагуляторе, В/м; H – напряженность магнитного поля в электромагнитном циклоне, А/м; B – величина магнитной индукции в гидроциклоне, Тл; μ_a – магнитная проницаемость сердечника, Гн/м; t – продолжительность очистки, ч.

Процесс очистки, физическая модель которого реализована на лабораторной установке, зависит от следующих факторов:

- исходной концентрации загрязнений X_1 , г/л;
- производительности процесса X_2 , л/с;
- плотности тока электрокоагулятора X_3 , А/м²;
- напряженности электрического поля в электрокоагуляторе X_4 , В/м;
- напряженности магнитного поля в электромагнитном гидроциклоне X_5 , 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 уровнях: напряженность электрического поля в электрокоагуляторе $X_4 = 60$ В/м; напряженность магнитного поля электрогидроциклона $X_5 = 10$ А/м. Интервалы варьирования управляющих факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования управляющих факторов

Variation levels of control factors

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

В качестве математической модели, описывающей зависимость параметров оптимизации от управляющих факторов, выбрано уравнение регрессии в виде полинома 2-го порядка

$$Y_{1,2} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ j>i}}^3 b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2.$$

Для изучения зависимости степени очистки и удельной энергоемкости процесса от трех управляющих факторов реализован трехуровневый план Бокса – Бенкена. Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 2. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. План не ортогонален для квадратичных эффектов, поэтому незначимые коэффициенты исключались пошагово (табл. 3).

В результате получены адекватные по критерию Фишера регрессионные модели со статистически значимыми коэффициентами:

$$Y_1 = 2,574 + 0,065X_1 - 0,123X_3^2;$$

$$Y_2 = 2,191 + 0,109X_1 + 0,083X_1X_2 - 0,085X_3^2.$$

Матрица плана и результаты опытов
Design matrix and results of experiments

Нормированное значение фактора			Число дублей	Среднее значение удельной энерго-емкости, кВт·ч/м ³	Дисперсия	Среднее значение удельной энерго-емкости, кВт·ч/м ³	Дисперсия	Конечная концентрация загрязнений, мг/л	Дисперсия	Конечная концентрация загрязнений, мг/л	Дисперсия
X_1	X_2	X_3									
1	1	0	4	2,56	0,0257	2,29	0,0182	2,64	0,0063	2,38	0,0086
1	-1	0	4	2,66	0,0195	2,15	0,0156	2,64	0,0004	2,22	0,0046
-1	1	0	4	2,58	0,0363	2,04	0,0089	2,51	0,0050	2,00	0,0016
-1	-1	0	4	2,57	0,0435	2,23	0,0663	2,51	0,0037	2,17	0,0042
1	0	1	4	2,53	0,0460	2,40	0,0689	2,52	0,0002	2,21	0,0342
1	0	-1	4	2,52	0,0157	2,28	0,0011	2,52	0,0000	2,21	0,0042
-1	0	1	4	2,36	0,0236	1,94	0,0020	2,39	0,0021	2,00	0,0033
-1	0	-1	4	2,26	0,0609	2,04	0,0050	2,39	0,0159	2,00	0,0018
0	1	1	4	2,46	0,0008	2,18	0,0714	2,45	0,0001	2,11	0,0054
0	1	-1	4	2,75	0,0008	2,00	0,0054	2,45	0,0893	2,11	0,0113
0	-1	1	4	2,36	0,0179	1,98	0,0320	2,45	0,0083	2,11	0,0159
0	-1	-1	4	2,39	0,0065	2,03	0,0630	2,45	0,0038	2,11	0,0058
0	0	0	12	2,55	0,0309	2,21	0,0858	2,57	0,0006	2,19	0,0003

Таблица 3

Коэффициенты регрессии и их абсолютные погрешности
Regression coefficients and their absolute errors

Обозначение	Удельная энергоёмкость Y_1		Степень очистки Y_2	
	Значение, кВт·ч/м ³	Абсолютная погрешность	Значение, мг/л	Абсолютная погрешность
b_0	2,5500	0,0947	2,2100	0,0936
b_1	0,0650	0,0580	0,1087	0,0573
b_2	0,0463	0,0580	0,0150	0,0573
b_3	-0,0288	0,0580	0,0188	0,0573
b_{12}	-0,0275	0,0820	0,0825	0,0811
b_{13}	-0,0175	0,0820	0,0550	0,0811
b_{23}	-0,0650	0,0820	0,0575	0,0811
b_{11}	-0,0175	0,0854	0,0425	0,0844
b_{22}	0,0600	0,0854	-0,0750	0,0844
b_{33}	-0,1200	0,0854	-0,0875	0,0844

Полученные уравнения регрессии показывают, что производительность процесса в исследованном диапазоне варьирования не оказывает существенного влияния на степень очистки, но влияет на удельную энергоёмкость во взаимодействии с исходной концентрацией загрязнений. При этом удельная энергоёмкость

снижается при уменьшении исходной концентрации загрязнений и одновременном увеличении производительности (рис. 2).

Влияние плотности тока электрокоагулятора на оба параметра оптимизации проявляется через квадратичные эффекты, которые указывают, что оптимальные значения этого фактора

находятся на границах интервала варьирования. При этом степень влияния плотности тока на уровень удельных энергозатрат увеличивается при уменьшении производительности процесса очистки (рис. 2а).

Зависимость уровней концентрации загрязнителя от исходной концентрации после очистки подобна зависимости уровней энергозатрат от этих же факторов (рис. 3а). Поэтому параметры оптимизации не являются конфликтующими, и оптимальный по обоим параметрам режим очистки реализуется на границах исследованного интервала варьирования плотности тока электрокоагулятора.

При этом и удельные энергозатраты, и остаточная концентрация загрязнителя после очистки снижаются при уменьшении его исходной концентрации и производительности процесса. Степень очистки, определяемая отношением концентраций загрязнителя до и после очистки, составляет до 99,9 % (рис. 3б).

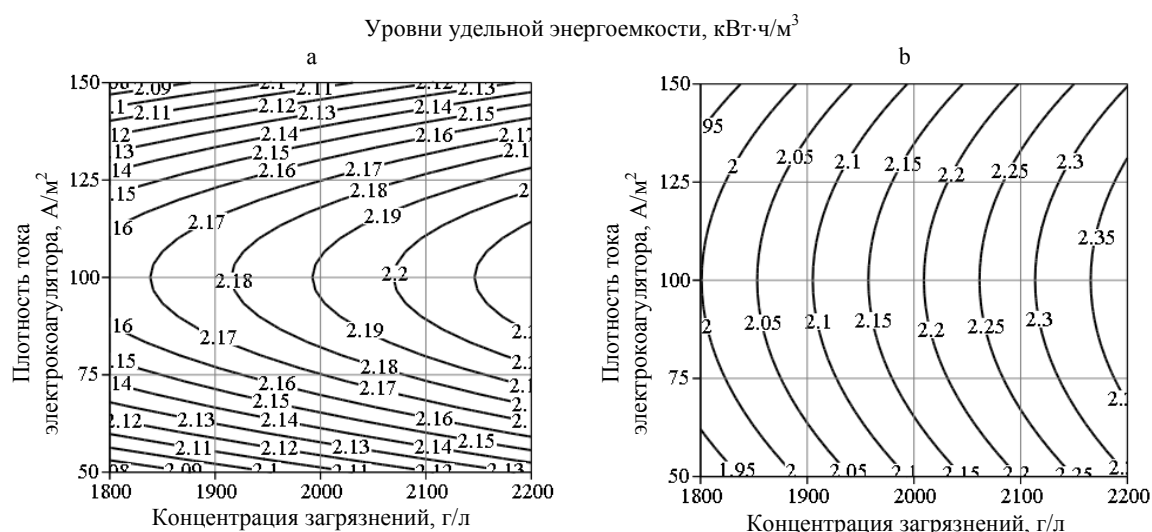


Рис. 2. Уровни удельной энергоёмкости в зависимости от исходной концентрации загрязнений, плотности тока электрокоагулятора при различной производительности процесса очистки: а – 0,3 л/с; б – 0,7 л/с

Fig. 2. Levels of specific energy consumption depending on initial concentration of pollution, current density of electric coagulator at different performance of cleaning process: а – 0.3 l/s; б – 0.7 l/s

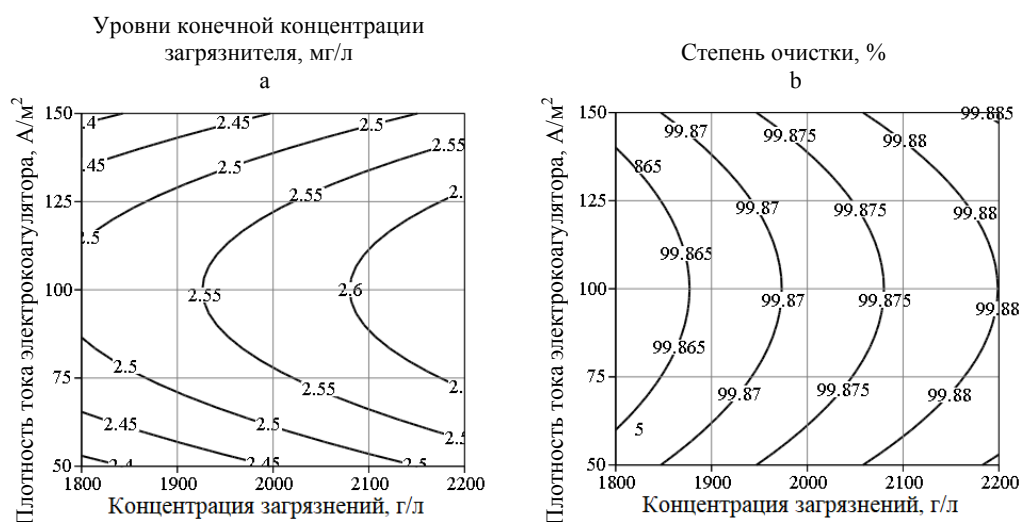


Рис. 3. Уровни концентрации загрязнителя (а) и степень очистки (б) в зависимости от исходной концентрации загрязнений и плотности тока электрокоагулятора

Fig. 3. Pollutant concentration levels (а) and degree of purification (б) depending on initial contaminant concentration and current density of electric coagulator

ВЫВОДЫ

1. Выполнено моделирование оптимизации процесса очистки стоков постов мойки авто-тракторной техники. Получены математические модели и определены оптимальные режимы очистки при наименьших удельных энергетических затратах и достаточно высоком качестве очистки (до 99,9 %).

2. Результаты проведенных исследований показали, что степень очистки стоков постов мойки автотракторной техники на предложенной установке можно достичь при ее производительности $G = 0,7$ л/с, плотности тока $j = 150$ А/м². Полученные значения будут использованы при реализации микропроцессорного управления режимом очистки в качестве управляющего воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутов, А. В. Очистка сточных вод постов мойки сельскохозяйственной техники с использованием электрических и магнитных полей / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф., 16–17 мая 2006 г., г. Москва: в 5 ч. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. Ч. 2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. С. 230–233.
2. Крутов, А. В. Удаление взвешенных частиц в очистном электромагнитном гидроциклоне / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Агропанорама. 2016. № 2. С. 13–18.
3. Мосин, О. В. Технологический расчет установок электрокоагуляции воды / О. В. Мосин // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 4. С. 62–85.
4. Моделирование промышленных электрофлотаторов с учетом структуры потоков / А. Б. Голованчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ. 2007. № 9. С. 15–17.
5. Авдеев, Б. А. Анализ воздействия магнитного поля на процесс сепарации в гидроциклонах / Б. А. Авдеев // Технический аудит и резервы производства. 2013. Т. 13, № 5/4. С. 45–47.
6. Разин, В. М. Математическая модель процесса движения заряженной частицы в веществе при наличии магнитного поля / В. М. Разин // Известия ТПУ. 2003. № 7. С. 44–47.
7. Ксенофонов, Б. С. Флотационная очистка сточных вод / Б. С. Ксенофонов. М.: Новые технологии, 2003. 160 с.
8. Костин, В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики / В. Н. Костин. СПб.: Недра, 2003. 120 с.
9. Шантарин, В. Д. Оптимизация процессов электрокоагуляционной доочистки питьевых вод / В. Д. Шантарин, В. В. Завьялов // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: сб. обзорной информации. 2003. № 5. С. 62–85.
10. Севернев, М. М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М. М. Севернев. Минск: Ураджай, 1994. 221 с.

11. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. Л.: Колос, 1980. 168 с.

Поступила 29.07.2019

Подписана в печать 26.09.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Krutau A. V., Boika M. A. (2006) Wastewater Treatment of Agricultural Machinery Washing Stations Using Electric and Magnetic Fields. *Energoobespechenie i Energo-sberezhenie v Sel'skom Khozyaistve: Tr. 5-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 16–17 maya 2006 g. Ch. 2. Energo-sberegayushchie Tekhnologii v Rastenievodstve i Mobil'noi Energetike* [Power Supply and Energy Saving in Agriculture: Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference, May 16–17, 2006]. Moscow, State Scientific Institution “The All-Russian Scientific–Research Institute for Agriculture Electrification, 230–233 (in Russian).
2. Krutau A. V., Boika M. A. (2016) Removal of Suspended Particles in Treatment Electromagnetic Hydrocyclone. *Agropanorama*, (2), 13–18 (in Russian).
3. Mosin O. V. (2014) Technological Calculation of Water Electrocoagulation Units. *Sanitekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie* [Sanitary Engineering, Heating, Air Conditioning], (4), 62–85 (in Russian).
4. Golovanchikov A. B., Vladimtseva I. V., Germasheva Yu. S., Dul'kina N. A. (2007) Modeling of Industrial Electric Flo-tation Units with Due Account of Flow Structure. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Izvestia VSTU*, (9), 15–17 (in Russian).
5. Avdeev B. A. (2013) Analysis of Magnetic Field Effect on Separation Process in Hydrocyclones. *Technicheskii Audit i Rezervy Proizvodstva = Technology Audit and Production Reserves*, 13 (5/4), 45–47 (in Russian).
6. Razin V. M. (2003) Mathematical Model of Charged Particle Motion in Substance in Presence of Magnetic Field. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, (7), 44–47 (in Russian).
7. Ksenofonov B. S. (2003) *Flotation Wastewater Treatment*. Moscow, Novye Tekhnologii Publ. 160 (in Russian).
8. Kostin V. N. (2003) *Optimization Problems of Electric Power Industry*. Saint-Petersburg, Nedra Publ. 120 (in Russian).
9. Shantarin V. D., Zavyalov V. V. (2003) Optimization of Electrocoagulation Post-Treatment of Drinking Water. *Nauchnye i Tekhnicheskiye Aspekty Okhrany Okruzha-yushchey Sredy [Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection]*, (5), 62–85 (in Russian).
10. Severnev M. M. (1994) *Energy-Saving Technologies in Agricultural Production*. Minsk, Uradzhay Publ. 221 (in Russian).
11. Melnikov S. V., Aleshkin V. R., Roshchin P. M. (1980) *Planning of Experiment in Researches of Agricultural Processes*. Leningrad, Kolos Publ. 168 (in Russian).

Received: 29.07.2019

Accepted: 26.09.2019

Published online: 30.09.2019