

УДК 681.5.015

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

Р. Ю. Ткачев

Кандидат технических наук, старший преподаватель  
Кафедра автоматизированного управления  
технологическими процессами  
Донбасский государственный технический университет  
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, Украина, 94204  
Контактный тел.: 096-223-29-42  
E-mail: tirpitz@ukr.net

*Наведені результати експериментальних досліджень процесу електрохімічного очищення стічних вод, отримані залежності впливу управляючих і збурюючих дій на ступінь очищення*

*Ключові слова: автоматизація, електрокоагуляція, очищення стічних вод, математична модель*

*Приведены результаты экспериментальных исследований процесса электрохимической очистки сточных вод, получены зависимости влияния управляющих и возмущающих воздействий на степень очистки*

*Ключевые слова: автоматизация, электрокоагуляция, очистка сточных вод, математическая модель*

## 1. Проблема и ее связь с научными и техническими задачами

С развитием промышленного сектора все чаще встает вопрос об очистке промышленных сточных вод и утилизации отходов. Ухудшающаяся экологическая ситуация вынуждает ужесточать требования к сбросу отходов и сточных вод предприятий. Как известно, практически ни одно предприятие не может работать без образования отходов и стоков.

Перспективными следует считать безреагентные методы обработки воды, не требующие доставки реагентов, устройств и емкостей для их хранения и приготовления, а также капитальных очистных сооружений и больших производственных площадей. К таким методам, в частности, относится электрохимическая коагуляция, которая позволяет улучшить с экологической точки зрения характеристики жидких систем. Этот метод обеспечивает высокий эффект удаления из воды загрязнений в виде взвесей (минерального, органического и биологического происхождения), коллоидов (соединений железа, веществ, обуславливающих цветность воды и т. д.), а также отдельных веществ, находящихся в молекулярном и ионном состоянии [1].

Поскольку эксплуатация таких систем очистки может быть значительно упрощена вследствие того, что электрохимические процессы поддаются механизации и автоматизации, то для автоматического управления процессом очистки необходимо определить математическую модель процесса.

## 2. Анализ исследований и публикаций

Значительное количество исследований в области электрохимической очистки промышленных стоков

проведены на полупроизводственных установках, состоящих из электрокоагулятора, аэратора и отстойника [1,2]. Исследованиями выяснено, что на очистку сточных вод и обработку осадка влияют расход железа, плотность тока, время очистки, расход электроэнергии, состав сточной воды. Также установлено различное влияние физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс электрокоагуляции, однако при этом отсутствует какая-либо информация о математических моделях и системах автоматического управления данного процесса.

## 3. Постановка задачи

Разработать информационную схему системы комплексной очистки сточных вод и определить адекватную математическую модель по каждому каналу, т.е. определить существующие каналы основных управляющих и возмущающих воздействий, а также перенных состояния.

## 4. Изложение материала и его результаты

Пилотная установка комплексной очистки, представляет собой каскадное соединение нескольких емкостей (рис. 1). Приведенная установка комплексной очистки промышленных сточных вод была разработана в НИПКИ "Параметр" ДонГТУ. Данная установка комплексной очистки промышленных сточных вод является оптимальной для многих производств, например, в угольной промышленности при осветлении шламовой воды угольных шахт, для подготовки воды в котельных небольшой производительности и т.д.

Принцип действия установки основан на электролизе с применением растворимых электродов. В результате электролиза происходит процесс восстановления и окисления компонентов, составляющих электролит. В воду переходят ионы двухвалентного железа, которые, соединяясь с гидроксильными группами, образуют гидроксид железа  $Fe(OH)_2$ , являющийся хорошим коагулянтом, который сорбирует вредные примеси образующимися хлопьями [1].

Сточная вода подается в проточный электрокоагуляционный отсек (электрокоагулятор) 1 (объем  $0,02 м^3$ ), затем в отстойник 2 (объем  $0,02 м^3$ ), из которого образовавшийся коагулянт периодически сбрасывается в шламонакопитель, а осветленная вода через ионообменный фильтр 3 (объем  $0,01 м^3$ ) подается к потребителю.

При электрохимической обработке сточной воды в ней разрушаются, флотируются и сорбируются вредные примеси хлопьями  $Fe(OH)_3$  и  $Fe(OH)_2$ , которые удаляются отстаиванием и фильтрованием.

Для определения математической модели были использованы экспериментальные методы исследования, ввиду сложности аналитического описания процессов, протекающих в каждой емкости. По проведенным экспериментальным исследованиям была определена информационная структура объекта управления, приведенная на рис. 2.

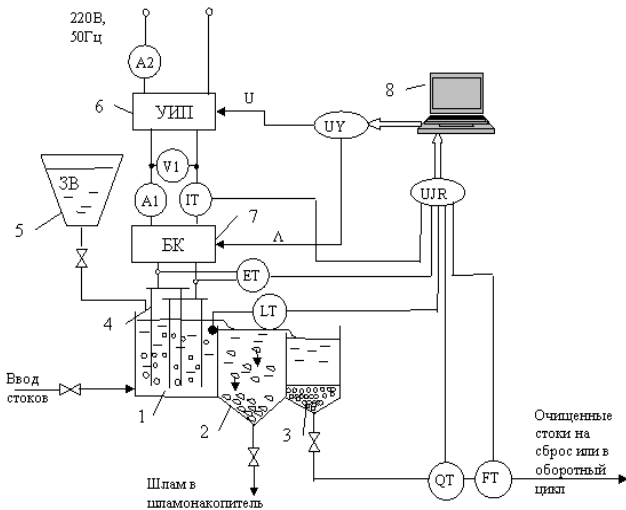


Рис. 1. Схема пилотной установки: 1 – электрокоагулятор; 2 – отстойник; 3 – ионообменный фильтр (ИОФ); 4 – электроды; 5 – емкость с раствором, используемым для внесения возмущений в работу электрокоагулятора; 6 – управляемый источник питания (УИП); 7 – блок контакторов (БК) для смены полярности электродов (переплюсовки); 8 – портативный компьютер; А1, А2 – амперметры; В1 – вольтметр; ИТ – датчик тока; ЕТ – делитель напряжения; ЛТ – датчик уровня; QT – датчик электропроводности (кондуктометр); FT – расходомер; UJR – многоканальный аналогово-цифровой преобразователь, UY – многоканальный цифроаналоговый преобразователь, U – сигнал управления, Δ – логический сигнал управления БК

Сущность экспериментальных методов исследования заключалась в том, что в поток на входе аппарата, вводится индикатор, а на выходе замеряется концен-

трация этого индикатора как функция времени. Индикатор вводился на вход потока в электрокоагулятор в виде стандартного сигнала: ступенчатого и импульсного. В качестве индикатора изменения концентрации использовался насыщенный раствор соли NaCl, который вводился практически мгновенно в количестве  $100 см^3$ . Ступенчатое возмущение наносилось изменением тока питающего напряжения и поддержанием его на заданном уровне для обеспечения постоянной концентрации растворяемого с электродов электрокоагулятора железа.

Для измерения концентрации был выбран контактный кондуктометрический метод, поскольку сточные воды представляют собой разбавленные растворы (не выше  $0,002 н$ ), при этом обеспечивается линейная зависимость электропроводности от концентрации.

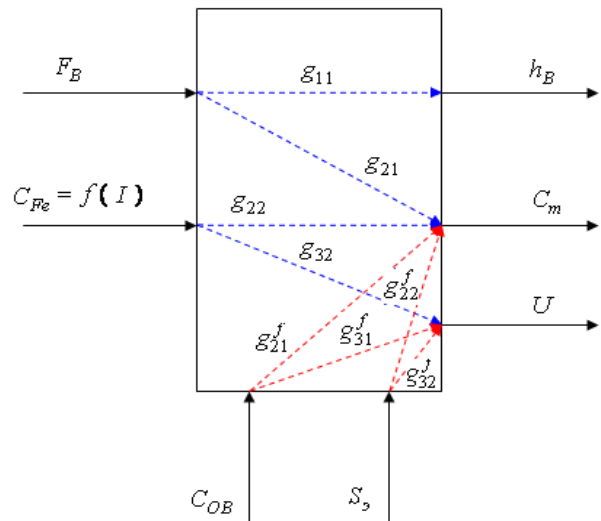


Рис. 2. Информационная схема объекта:  $F_B$  – расход исходной воды;  $h_B$  – уровень воды в электрокоагуляторе;  $I$  – ток, протекающий через пластины электрокоагулятора;  $C_{Fe}$  – концентрация ионов железа, растворенного с электродов;  $C_m$  – концентрация примесей (контроль по сопротивлению очищенной воды);  $C_{OB}$  – общая концентрация загрязнений в сточной воде;  $U$  – напряжение на электродах;  $S_3$  – степень пассивации электродов;  $g_{ij}(p), g_{ij}^f(p)$  – передаточные функции по соответствующему каналу

Проведенными исследованиями было выявлено, что входные и выходные величины можно описать зависимостью

$$y = \begin{bmatrix} g_{11}(p) & 0 & 0 \\ g_{21}(p) & g_{22}(p) & 0 \\ 0 & g_{32}(p) & 0 \end{bmatrix} \cdot u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ g_{31}^f(p) & g_{32}^f(p) \end{bmatrix} \cdot f, \quad (1)$$

где  $y = [h_B \ C_m \ U]^T$  – вектор выходных параметров, соответственно уровень воды в электрокоагуляторе, остаточная концентрация примесей в очищенной воде (контроль по сопротивлению), напряжение на электродах;  $u = [F_B \ I \ 0]^T$  – вектор управления, соответственно расход исходной воды и ток, протекающий через пластины электрокоагулятора;  $f = [C_{OB} \ S_3]^T$  –

вектор неконтролируемых возмущений, соответственно общая концентрация загрязнений в сточной воде и степень пассивации электродов;  $g_{ij}(p), g_{ij}^f(p)$  – передаточные функции по соответствующему каналу.

Передаточная функция  $g_{11}(p)$  объекта по каналу «расход-уровень» хорошо известна [3] и соответствует обеспечению материального баланса расходов исходной и очищаемой воды, необходимому уровню в электрокоагуляторе, и может быть представлена в виде

$$g_{11}(p) = \frac{1}{T_{11}p} e^{-\tau_{11}p}, \quad (2)$$

где –  $T_{11}$  – постоянная времени, равная 83 с;  
 $\tau_{11}$  – время запаздывания, равное 1.7с.

Экспериментальными исследованиями было установлено, что на процесс электрохимического растворения электродов движение жидкости в межэлектродном пространстве существенного влияния не оказывает, поэтому можно принять  $g_{21} \approx 0$ .

Идентификация объекта управления была осуществлена структурно-параметрическим методом, который основан на алгоритме Рутисхаузера [4]. Метод позволяет строить дискретные модели линейных динамических объектов на основе точных измерений значений входных измерений, а виду того, что ввод информации о состоянии технологических процессов в современных системах управления осуществляется в цифровом виде, то применение этого метода является целесообразным.

Возможность использования математического аппарата непрерывных дробей для определения дискретной передаточной функции (ДПФ) обусловлена тем, что ДПФ линейного объекта определяется как отношение Z-преобразований выхода объекта  $Y(z)$  и его входа  $U(z)$ . Причем элементы рядов представляют собой значения выходной и входной координаты объекта в дискретные моменты времени ( $y(kT)$  и  $u(kT)$ ), являющиеся исходными данными для процесса идентификации. При этом элементы  $y(kT)$  и  $u(kT)$  связаны разностными уравнениями, вид которых определяется структурой объекта [5].

Метод позволяет перейти от выражения, представляющего собой отношение конечных или бесконечных степенных рядов к непрерывной дроби, которая будет являться дробно-рациональной аппроксимацией исходной ДПФ объекта [5]. Исходя из строгой эквивалентности дискретной модели непрерывному объекту, можно восстановить исходную непрерывную передаточную функцию (НПФ) с помощью обратного Z-преобразования. Параметрическое соответствие модели объекту при этом, главным образом, зависит от ошибки дискретизации запаздывания. В общем случае запаздывание непрерывного объекта можно представить в виде:  $\tau = d \cdot T - \Delta\tau$ , где  $\Delta\tau$  - ошибка дискретизации запаздывания,  $0 \leq \Delta\tau < T$ .

В результате структурно-параметрической идентификации была получена передаточная функция для канала «ток–сопротивление»

$$g_{22}(p) = \frac{k_{22}}{(T_1p+1)(T_2p+1)} e^{-\tau_{22}p}, \quad (3)$$

где  $k_o$  – коэффициент передачи объекта;  $T_1, T_2, \tau$  – постоянные времени и время чистого запаздывания соответственно.

На рис. 3 приведены экспериментальные нормированные временные характеристики объекта управления на соответствующие возмущающие воздействия. Исследования показали, что объект по этому каналу имеет переменные параметры, зависящие от режима работы установки (табл.1). Так, при увеличении тока на 10 А параметры аппроксимирующей модели равны  $T_1=10$  мин,  $T_2=1$  мин,  $k=10$ ,  $\tau=15$  мин (кривая 1 рисунка 3а); при уменьшении  $T_1=9$  мин,  $T_2=6$  мин,  $k=7.2$ ,  $\tau=28$  мин (кривая 2).

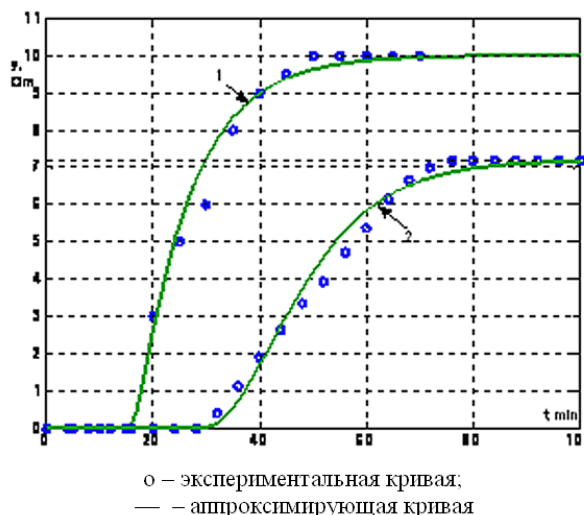


Рис. 3. Графики переходных процессов изменения сопротивления очищаемой жидкости при ступенчатом изменении тока на электродах с 20А до 30А (кривая 1) и с 20А до 10А (кривая 2)

Таблица 1

Параметры передаточной функции по каналу «ток–сопротивление»

Параметр	Экспериментальные данные			
	20 → 30А	30 → 20А	10 → 20А	20 → 10А
$k_{22}$ , Ом/А	0,10	0,072	0,15	0,11
$T_1$ , мин	10	9	3,5	3
$T_2$ , мин	1	6	0,1	0,25
$\tau_{22}$ , мин	16	28	15	24

Также выявлено, что с повышением тока (плотности тока) возрастают поляризационные явления и пассивация электродов, что приводит к возрастанию потребляемого напряжения и потерям электроэнергии на побочные процессы. Наряду с процессом уменьшения выхода железа по току резко возрастает напряжение на электродах, что приводит к нагреванию раствора и перерасходу электроэнергии.

Идентификация передаточных функций по вектору возмущения (общая концентрация загрязнений в сточной воде и степень пассивации электродов) на данном этапе автоматизации экспериментальной установки невозможна. Контролируемое напряжение  $U$  на электродах электрокоагулятора является не управляемым параметром, однако по данному параметру можно оценить экономичность процесса и снизить потребление

ние энергии за счет переполусовки электродов каждые 10–15 минут.

Определение передаточных функций по каналам «степень пассивации электродов - сопротивление»  $g_{22}^f(p)$  и «степень пассивации электродов - напряжение»  $g_{32}^f(p)$  не представляется возможным, поскольку «степень пассивации электродов» является не измеряемым параметром, влияние которого существенно уменьшается переполусовкой электродов. При разработке системы автоматического управления их можно будет рассматривать как неконтролируемые возмущения случайного характера.

Таким образом, зависимость (1) с учетом (2)–(3) имеет вид

$$y = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{11}p} e^{-\tau_{11}p} & 0 \\ 0 & \frac{k_{22}e^{-\tau_{22}p}}{(T_{1p}+1)(T_{2p}+1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_b \\ I \end{bmatrix} + f(C_{OB}, S_a).$$

## 5. Выводы

Экспериментальными исследованиями была определена информационная структура объекта управления и его математическая модель в виде передаточных функций по каждому каналу управления. При этом установлено, что объект управления по каналу «ток-электропроводность» имеет параметрические неопределенности, связанные с различными электрохимическими реакциями, протекающими в электрокоагуляционном блоке, степенью пассивации электродов, а также исходной концентрацией загрязняющих веществ.

Полученные модели будут использованы при разработке системы автоматического управления электрокоагуляционным блоком установки комплексной очистки сточных вод.

## Литература

1. Кульский, Л.А. Очистка воды электрокоагуляцией. / Л.А. Кульский, П.П. Строкач, В.А. Слипченко, Е.И. Сайгак. К.: Будівельник, -1978. – 112с.
2. 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.– М.: ВИНТИИ, –2003. –№ 5. – С.62-85.
3. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств. / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высшая школа, -1991. – 400с.
4. Джонс, У. Непрерывные дроби. Аналитическая теория и приложения / У. Джонс, В. Трон. – М.: Мир, -1985. – 414 с.
5. Ткачев, Р.Ю. Структурно-параметрическая идентификация объектом с рециклом на основе дискретной последовательности выходной координаты/ Р.Ю.Ткачев, О.В. Глушко // Збірник наукових праць ДонДТУ, Алчевськ: ДонДТУ, –2012. –№36. – С. 415-425.

## Abstract

*The insufficient attention is paid to the development of the given process mathematical model, in spite of considerable quantity of researches in the field of industrial wastes electrochemical purification. Experimental investigations connected with the definition of the mathematical model of purifying electrocoagulation installation wastes process in the form of the transmissional functions are described in the article. The analyses of the controlling influence and no controlled troubles acting the control object is made; the parameters influencing the economy of the process directly are defined; the controlling of these parameters leads to decrease of electricity consumption while electrocoagulation installation is working. The controlling object parametrical uncertainties which deal with the changes of parameters according to installation working conditions are investigated. The achieved models will be applied while developing automatic control system of electrocoagulation unit of complex purifying wastes set.*

**Keywords:** automatization, electrocoagulation, wastes purifying, mathematical model.