

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОАГУЛЯЦИЕЙ

Шестаков И.Я., Раева О.В., Никифорова Э.М., Еромасов Р.Г.

*ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения» (СФУ ИЦМиМ) Россия, 660025, г. Красноярск, пр. имени газ. Красноярский рабочий, 95; e-mail: O.V.Raeva@mail.ru*

Одним из наиболее перспективных направлений очистки воды от ионов металлов являются электрохимические методы с применением нерастворимых электродов и переменного асимметричного тока. Однако данные методы имеют свои недостатки – невысокая степень очистки и значительные удельные энергозатраты (1,5-2 (кВт·ч)/м<sup>3</sup>). В статье представлены результаты экспериментальных исследований электрохимического способа очистки воды в нестационарном электрическом поле с последующей коагуляцией, позволяющего увеличить степень очистки воды от ионов металлов при малых удельных энергозатратах (0,34 (кВт·ч)/м<sup>3</sup>). Максимальная степень очистки воды от всех рассматриваемых ионов достигалась при пропускании через нее переменного асимметричного тока в количестве 300 Кл/л с использованием нерастворимых разнородных электродов (нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0), введении коагулянта – сернокислого железа FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, начальная концентрация которого превышала начальную концентрацию каждого удаляемого иона в 2,5 раза, и дальнейшем отстаивании в течение 10 суток.

Ключевые слова: вода, электрохимический способ, коагулянт, переменный ток, отстаивание.

## STUDY OF WATER TREATMENT BY ELECTROCHEMICAL METHODS IN NON-STATIONARY ELECTRIC FIELD WITH SUBSEQUENT COAGULATION

Shestakov I.Y., Raeva O.V., Nikiforova E.M., Eromasov R.G.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education, Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals and Material Science Russia, 660025, Krasnoyarsk, 95 Krasnoyarsky Rabochy Av., e-mail: O.V.Raeva@mail.ru*

Electrochemical methods using insoluble electrodes and asymmetric alternating current is the most promising area of water treatment from metal ions. However, these methods have certain disadvantages - low degree of purification and high specific energy consumption (1.5-2 (kW·h)/m<sup>3</sup>). This article presents the results obtained by experimental studies of electrochemical method of water treatment in a non-stationary electric field followed by coagulation, which allows to increase the degree of water purification from metal ions and decrease specific energy consumption (0.34 (kW·h)/m<sup>3</sup>). The maximum degree of water purification from all specified ions was achieved by passing through it asymmetrical alternating current 300 coulomb/l with application of insoluble dissimilar electrodes (stainless steel 12X18H10T and titanium alloy OT 4-0), introducing coagulating agent - ferrous sulphate (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O), the initial concentration of which was by 2.5 higher than the initial concentration of each ion removed, and subsequent settling during 10 days.

Keywords: waters, electrochemical method, coagulating agent, alternating current, settling.

### Введение

С каждым годом во всем мире растет потребность в чистой пресной воде, что связано, прежде всего, с бурным ростом промышленных производств. На сегодняшний день промышленностью используется около 30% устойчивого стока всех земных рек. Возвращаются эти воды в виде так называемых сточных вод, содержащих большое количество вредных веществ.

К наиболее распространенным загрязнителям относятся ионы тяжелых металлов, попадающие в естественные водоемы в составе сточных вод гальванических производств. Попытки создания установок для нейтрализации сточных вод гальванических производств не дают положительных результатов, потому что на нейтрализацию направляют смешанные стоки, содержащие целый «букет» особо опасных тяжелых металлов. Из-за повышенного загрязнения природных водоисточников традиционно применяемые технологии обработки воды стали недостаточно эффективными [1; 2; 9].

К одному из наиболее перспективных направлений очистки воды следует отнести электрохимические методы, и в частности электрохимические методы очистки воды на переменном токе промышленной частоты.

Однако большое потребление электроэнергии и использование растворимых электродов ограничивают применение электрохимических процессов на практике.

В Сибирском государственном аэрокосмическом университете разработан способ очистки воды и водных растворов от анионов и катионов электрохимическим методом с применением нерастворимых электродов и переменного асимметричного тока [3-8].

#### **Методика исследований**

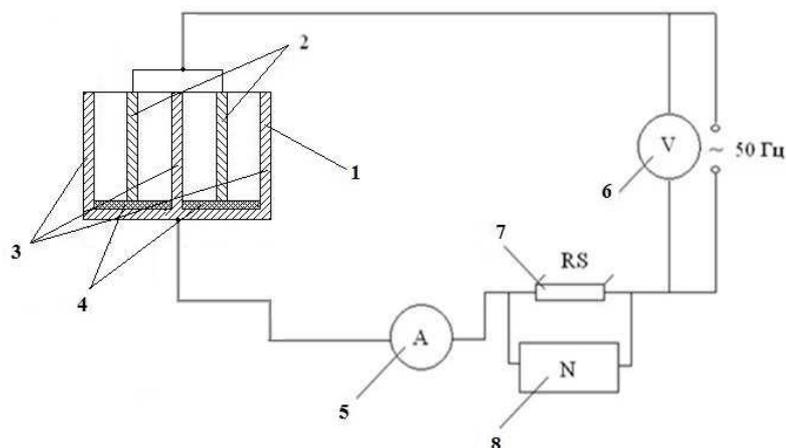
Для реализации предлагаемого способа процесс очистки воды проводят в электролизере из чередующихся электродов, выполненных в виде пластин. Материал электродов: нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0. Расстояние между электродами 12 мм. Объем заливаемой воды 1 л. Электроды подключались параллельно к источнику переменного тока частотой 50 Гц; боковые стенки при использовании электролизера являлись рабочими. Температура очищаемой воды 20-25 °С. Переменный электрический ток пропускался через воду в течение 10 минут при силе тока 0,5 А и напряжении на клеммах электродов 4,1 В.

Обработке подвергалась вода, содержащая ионы кадмия (II), меди (II), никеля (II) и хрома (VI). Начальная концентрация каждого иона в растворе 0,5 мг/л.

После пропускания переменного электрического тока в воду вводился хорошо растворимый коагулянт – сернокислое железо  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , далее вода отстаивалась. При введении в воду коагулянта происходило его растворение и электролитическая диссоциация с последующим образованием малорастворимого гидрата окиси железа (III), выпадающего в осадок в виде хлопьев и выступающего в качестве комплексообразователя. Соотношение начальных концентраций иона комплексообразователя и удаляемого иона ( $C_{\text{Fe}^{3+}} / C_{\text{oi}}$ ) изменялось от 1:1 до 2,5:1. Время отстаивания воды ( $\tau_{\text{отс}}$ ) изменялось от 1 до 10 суток.

Количественный анализ ионов, содержащихся в водном растворе после очистки, проводился на масс-спектрометре Agilent 7500 ICP -MS.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:**  
 1 – корпус; 2 – титановые электроды ОТ4-0; 3 – стальные электроды 12Х18Н10Т;  
 4 – пластины диэлектрические (оргстекло); 5 – амперметр; 6 – вольтметр;  
 7 – шунт измерительный; 8 – осциллограф С1-83.

Степень очистки определялась по формуле, %:

$$Y = \left( \frac{C_o - C_k}{C_o} \right) 100,$$

где  $C_o$ ,  $C_k$  – начальная и конечная концентрации удаляемого иона металла, мг/л.

Удельные энергозатраты  $W$  определялись по формуле, (кВт·ч)/м<sup>3</sup>:

$$W = \frac{IU\tau}{V} 10^{-3},$$

где  $I$  – сила тока, А;

$U$  – напряжение на клеммах электродов, В;

$\tau$  – время пропускания электрического тока, ч;

$V$  – объем заливаемой воды, м<sup>3</sup>;

$10^{-3}$  – переводной коэффициент из Вт в кВт.

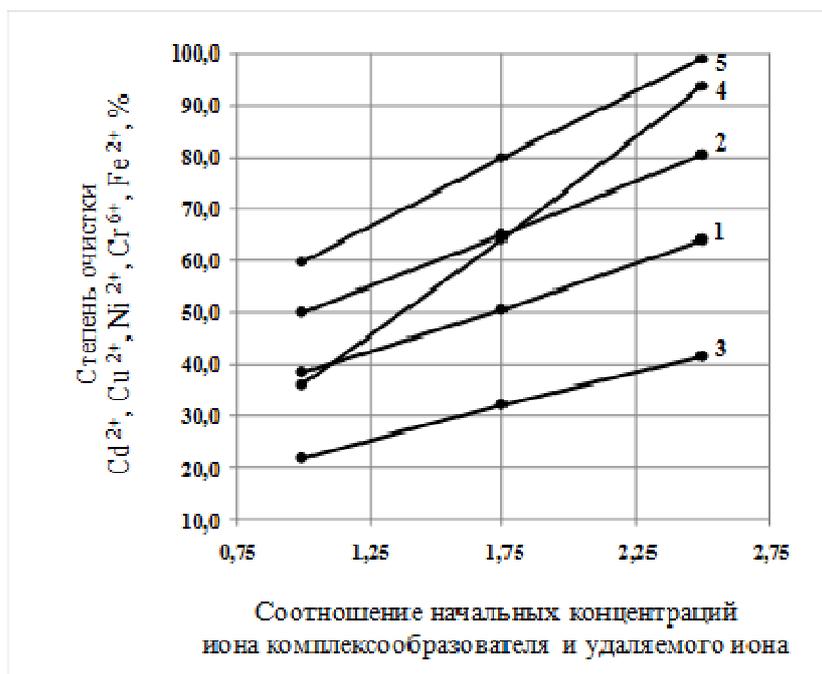
### Результаты исследований и их обсуждение

Исследование влияния соотношения начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона на степень очистки проводилось при постоянном времени отстаивания (10 суток).

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1 и на рис. 2.

**Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований влияния соотношения начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона на степень очистки**

Ион металла	$C_{o_{Fe^{2+}}}/C_{oi}$	$C_o$ , мг/л	$C_k$ , мг/л	$Y$ , %
$Cd^{2+}$	1:1	0,5	0,308	38,4
	1,75:1		0,247	50,6
	2,5:1		0,180	64,0
$Cu^{2+}$	1:1	0,5	0,250	50,0
	1,75:1		0,175	65,0
	2,5:1		0,098	80,4
$Ni^{2+}$	1:1	0,5	0,390	22,0
	1,75:1		0,339	32,2
	2,5:1		0,292	41,6
$Cr^{6+}$	1:1	0,5	0,319	36,2
	1,75:1		0,179	64,2
	2,5:1		0,031	93,8
$Fe^{2+}$	1:1	2	0,800	60,0
	1,75:1	3,5	0,697	80,1
	2,5:1	5	0,040	99,2



**Рис. 2. Зависимость степени очистки ионов металлов от соотношения начальных концентраций иона комплекссообразователя и удаляемого иона.**

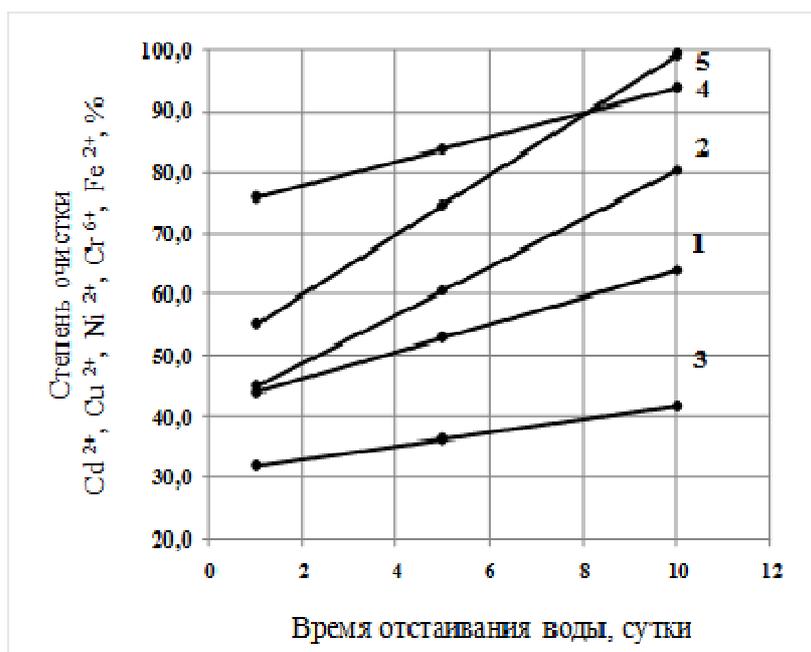
Степень очистки: 1 – кадмия; 2 – меди; 3 – никеля; 4 – хрома; 5 – железа.

Исследование влияния времени отстаивания на степень очистки проводилось при постоянном соотношении начальных концентраций иона комплекссообразователя и удаляемого иона (2,5:1).

Результаты экспериментальных исследований влияния времени отстаивания на степень очистки представлены в таблице 2 и на рис. 3.

**Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований влияния времени отстаивания на степень очистки**

Ион металла	$\tau_{отс}$ , сутки	$C_0$ , мг/л	$C_k$ , мг/л	$Y$ , %
$Cd^{2+}$	1	0,5	0,280	44,0
	5		0,236	52,8
	10		0,180	64,0
$Cu^{2+}$	1	0,5	0,276	44,8
	5		0,197	60,6
	10		0,098	80,4
$Ni^{2+}$	1	0,5	0,341	31,8
	5		0,319	36,2
	10		0,292	41,6
$Cr^{6+}$	1	0,5	0,121	75,8
	5		0,081	83,8
	10		0,031	93,8
$Fe^{2+}$	1	2	0,900	55,0
	5	3,5	0,886	74,7
	10	5	0,040	99,2



**Рис. 3. Зависимость степени очистки ионов металлов от времени отстаивания воды.**

Степень очистки: 1 – кадмия; 2 – меди; 3 – никеля; 4 – хрома; 5 – железа.

Из графиков видно, что увеличение соотношения начальных концентраций иона комплексообразователя и удаляемого иона и времени отстаивания воды приводит к значительному увеличению степени очистки рассматриваемых ионов при малых удельных энергозатратах ( $0,34 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ).

При увеличении соотношения начальных концентраций от 1:1 до 2,5:1 степень очистки увеличивается для кадмия в 1,7 раза, меди – 1,6, никеля – 1,9, хрома – 2,6 и железа – 1,7.

При увеличении времени отстаивания воды от 1 до 10 суток степень очистки увеличивается для кадмия в 1,5 раза, меди – 1,8, никеля – 1,3, хрома – 1,2 и железа – 1,8.

### **Выводы**

Экспериментальные исследования показали, что наибольшая степень очистки для всех рассматриваемых ионов металлов достигается при пропускании через очищаемую воду переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых электродов (нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0), введением коагулянта – сернокислого железа  $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  в соотношении начальных концентраций иона комплексообразователя и удаляемого иона 2,5:1 и отстаиванием воды в течение 10 суток. При этом степени очистки равны: для кадмия 64%, меди – 80,4%, никеля – 41,6%, хрома – 93,8% и железа – 99,2%. Удельные энергозатраты составляют  $W = 0,34 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/м}^3$ . В то время как при очистке электрохимическим способом с применением нерастворимых электродов и переменного тока удельные энергозатраты составляют  $1,5\text{-}2 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/м}^3$ .

### **Список литературы**

1. Водное хозяйство промышленных предприятий : справочное издание ; в 2-х книгах / Аксенов В.И. [и др.]; под ред. В.И. Аксенова. – М. : Теплотехник, 2005. – Кн. 1. – 640 с.
2. Ключков Б.Я. Экологические проблемы гальванотехники // Машиностроитель. – 1997. – № 6. – С. 33-35.
3. Стрюк А.И.[и др.] Способ очистки воды и водных растворов от анионов и катионов : Патент РФ № 2213701, С 02 F 1/46//С 02 F 103:16. Оpubл. Б.И. № 28, 10.10.2003.
4. Стрюк А.И. [и др.] Установка очистки воды и водных растворов от анионов и катионов : С. № 18532, С 02 F 1/46. Оpubл. Б.И. №18, 27.06.2001.
5. Шестаков И.Я., Вдовенко В.Г. Способ электрохимической очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов : А.С. № 1724591, С 02 F 1/46. Оpubл. Б.И. № 13 07.04.1992.

6. Шестаков И.Я., Герасимова Л.А. Исследование электрохимических способов очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов // Сб. САА. – 1996. – С. 32-35.
7. Шестаков И.Я., Раева О.В., Фейлер О.В. О механизме электрохимической очистки сточных вод переменным током // Вестник СибГАУ. – 2011. – № 1/34. – С. 147-150.
8. Шестаков И.Я., Раева О.В. Электрохимический метод очистки сточных вод переменным током // Техника и технологии. СФУ. – 2011. – № 4/3. – С. 348-355.
9. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. – М. : АСВ, 2004. – 704 с.

**Рецензенты:**

Петров Михаил Николаевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электронная техника и телекоммуникации», Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева (СибГАУ), г. Красноярск.

Смирнов Николай Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретическая механика», Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева (СибГАУ), г. Красноярск.