

По результатам расчетов среднего значения пор наблюдается тенденция к снижению количества пор с ростом толщины покрытия.

Исследования показали, что характер пористости оксидного покрытия зависит от толщины, а следовательно, от технологических режимов обработки. Установлено, что минимальная пористость покрытий получена при следующих режимах: плотность тока – 15 А/дм², напряжение до 520 В, $I_k/I_a = 0,8$ и время обработки – 60 мин. Объясняется это тем, что осаждение оксида происходит и внутри пор, что приводит к уменьшению их диаметра и постепенному зарастанию. Процесс зарастания пор ведет к снижению значения объемной пористости до 8–10 %.

Библиографические ссылки

1. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов [и др.]. М. : Экомет, 2005. 368 с.
2. Михеев А. Е., Трушкина Т. В., Гирн А. В., Ивасев С. С. Химические процессы при микродуговом оксидировании // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 212–216.
3. Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. М. : Наука, 1971. 266 с.

4. Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий в агрессивных средах // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (53). С. 179–184.

References

1. Suminov I. V. Epel'fel'd A. V., Lyudin V. B. [et al.] *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* [Microarc oxidation theory, technology and equipment]. Moscow, Ekomet Publ., 2005, 368 p.
2. Miheev A. E., Trushkina T. V., Girn A. V., Ivasev S. S. [Chemical processes at microarc oxidation]. *Vestnik SibGAU*. 2013, vol. 48, no. 2, p. 212–216 (In Russ.).
3. Tihonov V. N. *Analiticheskaya khimiya aluminiya* [Analytical chemistry of aluminium]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 266 p.
4. Trushkina T. V., Miheev A. E., Girn A. V. [Corrosion resistance of MAO coatings in corrosive environments]. *Vestnik SibGAU*. 2014, vol. 53, no. 1, p. 179–184 (In Russ.).

© Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В., Алякрецкий Р. В., Раводина Д. В., 2014

УДК 628.16.087

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ ПРИ БАРБОТИРОВАНИИ ВОЗДУХОМ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОАГУЛЯЦИЕЙ И ОТСТАИВАНИЕМ

И. Я. Шестаков¹, О. В. Раева²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: yakovlevish@mail.ru

²ОАО «Красмаш»
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29
E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований очистки воды от ионов металлов комбинированным способом, заключающимся в электрохимическом воздействии переменным током при барботировании воздухом с последующей коагуляцией и отстаиванием. Наибольшая степень очистки воды достигается при пропускании через очищаемую воду переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых разнородных электродов (нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0) при барботировании воздухом, введении коагулянта – сернокислого железа $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ в соотношении начальных концентраций иона-комплексообразователя и удаляемого иона 5:1 и отстаивании воды в течение 8 суток.

Ключевые слова: вода, электрохимическое воздействие, барботирование воздухом, переменный ток, коагулянт, отстаивание.

WATER CLEANING FROM METAL IONS BY ELECTROCHEMICAL TREATMENT WITH ALTERNATING CURRENT AND AIR BUBBLING FOLLOWED BY COAGULATION AND SETTLING

I. Ya. Shestakov¹, O. V. Rayeva²

¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: yakovlevish@mail.ru

²JSC Kras mash
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation
E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru

The article presents the results of experimental studies of water cleaning from metal ions by combined method which includes the electrochemical treatment by alternating current and simultaneous air bubbling followed by coagulation and settling. The highest degree of water cleaning from all considered metal ions is achieved by passing through water to be cleaned the asymmetrical alternating current using dissimilar insoluble electrodes (stainless steel 12X18H10T, titanium alloys OT 4-0) at air bubbling, introducing coagulant – ferrous sulfate $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ with the initial ratio of concentration complex forming ion and exhaust ion 5:1 and water settling for 8 days.

Keywords: water, electrochemical treatment, air bubbling, AC current, coagulant, settling.

Загрязнение воды является одной из острых экологических проблем в мире. Более 90 % сточных вод сбрасывается в открытые водоемы без предварительной очистки. В большей мере причиной тому являются сточные воды гальванических производств, содержащие целый ряд ионов металлов, пагубно воздействующих на здоровье людей и окружающую среду. Поэтому рациональное использование водных ресурсов и сохранение чистоты природных вод стало одной из актуальных проблем человечества.

В настоящее время существует большое количество способов очистки воды и водных растворов – механические, химические, электрические, физические, биологические, комбинированные и др. [1]. Например, для очистки воды от железа эффективно используется отстаивание, от меди, никеля, хрома (VI) широко применяют электрокоагуляцию, ионообменные технологии, биологическую очистку и т. д. Сточные воды гальванических производств содержат совокупность различных ионов металлов при концентрации последних 0,5 мг/л и менее. Исследований по комплексной очистке воды от ионов металлов при таких условиях недостаточно.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований очистки воды от ионов металлов комбинированным способом, заключающимся в электрохимическом воздействии переменным током при барботировании воздухом с последующей коагуляцией и отстаиванием.

Электрохимическое воздействие переменным асимметричным током проводили в реакторе с использованием пар нерастворимых разнородных электродов [2–7]. Электрохимический реактор выполнен из чередующихся электродов в виде пластин толщиной 1 мм. Материал пластин: нержавеющая сталь 12X18H10T (3 пластины) и титановый сплав OT4-0 (2 пластины). Расстояние между электродами 12 мм. Электроды подключали параллельно к источнику переменного тока частотой 50 Гц. Барботирование очищаемой воды проводили воздухом,

который пропускали через воду при помощи компрессора по трубкам, расположенным между электродами. Отверстия для прохода воздуха равномерно распределены по длине трубки. Наружный диаметр трубки равен расстоянию между электродами – 12 мм, диаметр отверстий 1 мм. Объем заливаемой воды 1 л. Переменный электрический ток пропускали через воду в течение 10 мин при силе тока 0,5 А и напряжении на клеммах электродов 5,6 В. В воде растворяли соли Cd(II), Cu(II), Ni(II), Cr(VI) и Fe(III) при средней концентрации каждого иона 0,5 мг/л.

После электрохимической обработки в воду добавляли коагулянт – сернокислое железо $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ при различном соотношении начальных концентраций иона-комплексобразователя и удаляемого иона ($C_{oFe^{2+}}/C_{oi}$). 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 комплексобразователя. Соотношение начальных концентраций иона-комплексобразователя и удаляемого иона ($C_{oFe^{2+}}/C_{oi}$) изменяли от 1:1 до 5:1. Далее воду отстаивали в закрытых емкостях при температуре 20–25 °С и атмосферном давлении. Время отстаивания воды ($\tau_{отс}$) изменяли от 1 до 8 суток.

Опыты проводили с использованием лабораторных автотрансформаторов ЛАТР-220-9 и компрессора АСО-308 30W. Для регистрации параметров процесса использовали стандартные приборы – вольтметр (класс точности 0,4), амперметр (0,5), осциллограф С1-83 (0,5).

Принципиальная схема экспериментальной установки и схема электрохимического реактора представлены на рис. 1, 2.

Степень очистки определяли по формуле

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

где C_0 , C_k начальная и конечная концентрации удаляемого иона металла, мг/л.

Удельные энергозатраты W на очистку единицы объема воды складывались из затрат электроэнергии на электрохимическую обработку воды $W_{\text{Э}}$ и на работу компрессора $W_{\text{К}}$:

$$W = W_{\text{Э}} + W_{\text{К}} [\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3],$$

$$W_{\text{Э}} = \frac{IU\tau_{\text{пр}}}{V} 10^{-3}, \quad W_{\text{К}} = \frac{P_{\text{К}}\tau_{\text{пр}}}{V} 10^{-3},$$

где I – сила тока, А; U – напряжение на клеммах электродов, В; $\tau_{\text{пр}}$ – время пропускания электрического тока через очищаемую воду, ч; V – объем заливаемой воды, м³; $P_{\text{К}}$ – мощность компрессора, Вт; 10^{-3} – переводной коэффициент из Вт в кВт.

Исследование влияния соотношения начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона на степень очистки воды проводилось при постоянном времени отстаивания (8 суток).

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

Исследование влияния времени отстаивания воды на степень очистки проводилось при постоянном соотношении начальных концентраций иона-комплексобразователя и удаляемого иона (5:1).

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.

Эксперименты показали, что повышение соотношения начальных концентраций иона-комплексобразователя и удаляемого иона металлов более чем 5:1 и времени отстаивания более 8 суток не приводят к существенному увеличению степени очистки воды от ионов.

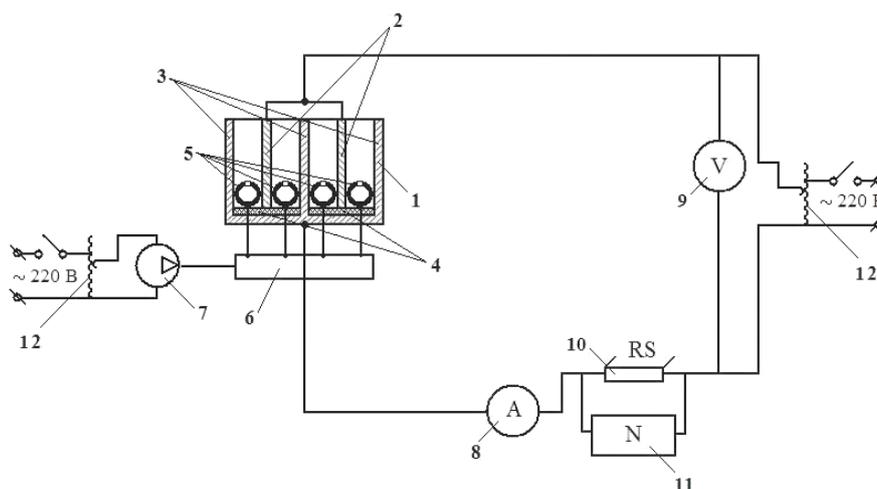


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – корпус; 2 – титановые электроды ОТ4-0; 3 – стальные электроды 12Х18Н10Т; 4 – пластины диэлектрические (оргстекло); 5 – трубки ПВХ; 6 – ресивер; 7 – компрессор АСО-308; 8 – амперметр; 9 – вольтметр; 10 – шунт измерительный; 11 – осциллограф С1-83; 12 – автотрансформаторы

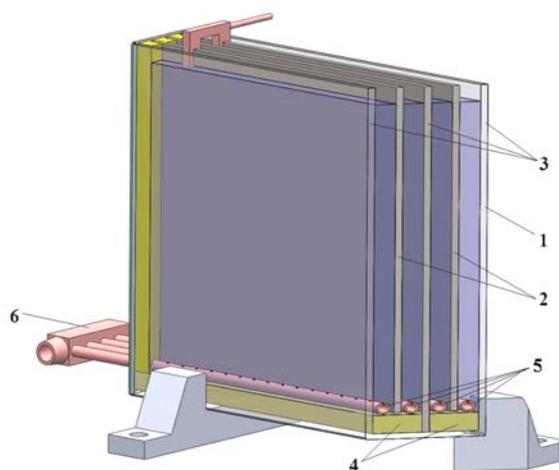


Рис. 2. Схема электрохимического реактора:

1 – корпус; 2 – титановые электроды ОТ4-0; 3 – стальные электроды 12Х18Н10Т; 4 – пластины диэлектрические (оргстекло); 5 – трубки ПВХ; 6 – ресивер

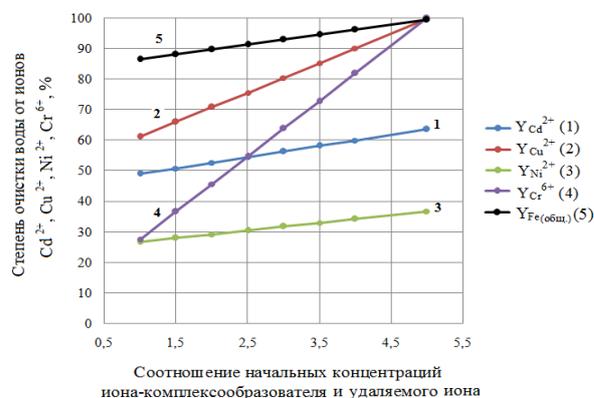


Рис. 3. Зависимость степени очистки воды от соотношения начальных концентраций иона-комплексобразователя и удаляемого иона (степень очистки воды от: 1 – кадмия; 2 – меди; 3 – никеля; 4 – хрома; 5 – железа)

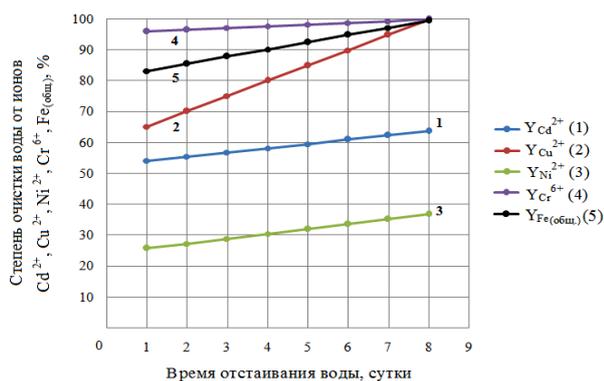


Рис. 4. Зависимость степени очистки воды от времени отстаивания воды (степень очистки воды от: 1 – кадмия; 2 – меди; 3 – никеля; 4 – хрома; 5 – железа)

При увеличении соотношения начальных концентраций от 1:1 до 5:1 степень очистки увеличивается для кадмия в 1,3 раза, меди – в 1,6 раза, никеля – в 1,4 раза, хрома – в 3,8 раза и железа – в 1,2 раза.

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

Экспериментальные исследования показали, что наибольшая степень очистки воды от всех рассматриваемых ионов металлов достигается комбинированным способом, заключающимся в пропускании через очищаемую воду переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых разнородных электродов (нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0) при барботировании воздухом, введении коагулянта – сернокислого железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в соотношении начальных концентраций иона-комплексобразователя и удаляемого иона 5:1 и отстаивании воды в течение 8 суток. При этом степень очистки воды равна: от кадмия – 63,3 %, от меди – 99,1 %, от никеля – 36,3 %, от хрома – 98,4 % и от железа – 99,3 %. Удельные энергозатраты составляют $W = 1,8$ (кВт·ч)/м³.

Комбинированный способ очистки позволил очистить воду от ионов хрома (VI), меди (II) и железа до ПДК. Для очистки воды от ионов никеля и кадмия необходимо подобрать другой коагулянт.

Библиографические ссылки

1. Аксенов В. И. [и др.]. Водное хозяйство промышленных предприятий : справочное издание. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. В. И. Аксенова. М. : Теплотехник, 2005. 640 с.

2. Способ очистки воды и водных растворов от анионов и катионов : патент РФ 2213701 : С 02 F 1/46 С 02 F 103:16. / Стрюк А. И., Шестаков И. Я., Фадеев А. А., Фейлер О. В., Сурьяков А. А., Кушнир А. А. Оpubл. 10.10.2003. Бюл. № 28.

3. Установка очистки воды и водных растворов от анионов и катионов : а. с. 18532 : С 02 F 1/46 /

А. И. Стрюк, И. Я. Шестаков, А. А. Фадеев, О. В. Фейлер, А. А. Сурьяков, А. А. Кушнир. Оpubл. 27.06.01, Бюл. № 18.

4. Способ электрохимической очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов : а. с. 1724591 : С 02 F 1/46 / И. Я. Шестаков, В. Г. Вдовенко. Оpubл. 07.04.92, Бюл. № 13.

5. Шестаков И. Я., Раева О. В., Фейлер О. В. О механизме электрохимической очистки сточных вод переменным током // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 1(34). С. 147–150.

6. Шестаков И. Я., Раева О. В. Электрохимический метод очистки сточных вод переменным током // Техника и технологии. СФУ. 2011. № 4/3. С. 348–355.

7. Шестаков И. Я., Раева О. В., Никифорова Э. М., Еромасов Р. Г. Исследование очистки воды электрохимическим способом в нестационарном электрическом поле с последующей коагуляцией [Электронный ресурс]. URL: www.science-education.ru/107-8154 (дата обращения: 10.03.2014).

References

1. Aksenov V. I., Ladygichev M. G., Nishkova I. I., Nikulin V. A., Klyain S. E., Aksenov E. V. *Vodnoe hozjajstvo promyshlennyh predpriyatij* [Water equipment of the industrial enterprises]. Moscow, Teplotekhnik Publ., 2005, 640 p.

2. Stryuk A. I., Shestakov I. Ya., Fadeev A. A., Feiler O. V., Sursyakov A. A., Kushnir A. A. *Sposob ochistki vody i vodnykh rastvorov ot anionov i kationov* [A method of purifying water and aqueous solutions of anions and cations]. Patent RF, no. 2213701, 2003.

3. Stryuk A. I., Shestakov I. Ya., Fadeev A. A., Feiler O. V., Sursyakov A. A., Kushnir A. A. *Ustanovka ochistki vody i vodnykh rastvorov ot anionov i kationov* [Installation of the purification of water and aqueous solutions of anions and cations]. Author's certificate no. 18532, Publ. in B.I., no. 18, 2001.

4. Shestakov I. Ya., Vdovenko V. G. *Sposob elektrokhimicheskoy ochistki vody i vodnykh rastvorov ot ionov tyazhelykh metallov* [Installation of the purification of water and aqueous solutions of anions and cations]. Author's certificate no. 1724591, Publ. in B.I., no. 13, 1992.

5. Shestakov I. Ya., Raeva O. V., Feiler O. V. [On the mechanism of electrochemical wastewater alternating current]. *Vestnik SibGAU*. 2011, vol. 34, no. 1, p. 147–150 (in Russ.).

6. Shestakov I. Ya., Raeva O. V. [Electrochemical method of wastewater alternating current]. *Tekhnika i tehnologii. SFU*. 2011, no. 4/3, p. 348–355 (in Russ.).

7. Shestakov I. Ya., Raeva O. V., Nikiforova E. M., Eromasov R. G. Study of water treatment by electrochemical methods in non-stationary electric field with subsequent coagulation. *Journal of Modern problems of science and education*, 2013, no. 1, available at: www.science-education.ru/107-8154. (accessed 10.03.2014).

© Шестаков И. Я., Раева О. В., 2014