

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ АММИАЧНО-ТАРТРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕДИ (II)

А.Б. Фадеев

fadeev89@mail.ru

Е.Н. Кузин

e.n.kuzin@muctr.ru

Н.Е. Кручинина

krutch@muctr.ru

Т.И. Носова

nti16041998@gmail.com

Е.В. Костылева

elenkostyleva@gmail.com

РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Очистка сточных вод от соединений тяжелых металлов — сложная и актуальная задача. Одним из основных источников загрязнения окружающей среды ионами тяжелых металлов являются сточные воды (промывные) процессов нанесения гальванических покрытий. Комплексные электролиты на основе соединений меди устойчивы в широком диапазоне pH и при попадании в воду не могут быть удалены традиционным методом (нейтрализацией и осаждением). Проведена оценка эффективности различных методов физико-химической очистки воды для удаления из сточной воды меди (II) в форме сложных комплексных соединений. Установлено, что наибольшей эффективностью в процессе очистки воды с использованием коагулянтов обладает титанилсульфат. Эффективность очистки с использованием соединений титана достигает 85 %, что в среднем на 30...40 % выше, чем при использовании традиционных коагулянтов на основе соединений алюминия или железа. Процессы электрокоагуляции позволяют эффективно удалять из воды комплексные соединения меди за счет сочетания процессов окисления органической составляющей и коагуляции солями железа. Установлено, что «продвинутые» окислительные процессы (AOPs-процессы, основанные на реакции с гидроксильным радикалом) на основе пероксида водорода (фентон-процессы) позволяют очищать сточные воды от соединений меди на 99,9 %. Несмотря

Ключевые слова

Комплексный электролит, очистка воды, коагуляция, адсорбция, деструкция

на высокую эффективность процессы адсорбции	
целесообразно использовать только на стадии до-	Поступила 13.05.2020
очистки воды от предварительно скоагулированных и	Принята 15.06.2020
окисленных загрязняющих веществ	© Автор(ы), 2020

Работа выполнена в рамках программы поддержки молодых ученых-преподавателей РХТУ им. Д.И. Менделеева (заявка № 3-2020-013)

Введение. Электронные устройства и цифровые технологии стали постоянными «спутниками» каждого человека. Основой электронных устройств являются печатные платы различного назначения. С каждым годом возрастают объемы их производства, а вместе с этим и объемы потребляемой и сбрасываемой воды.

Одним из источников образования сточных вод при производстве печатных плат является процесс их металлизации. Этот процесс проводят для получения токопроводящих участков, отверстий, площадок, разъемов и других частей платы, а также для защиты контактов от окисления в процессах дальнейшей обработки детали (например, травления) [1, 2].

В процессе производства печатных плат можно выделить несколько основных технологических операций, сопровождающихся значительным потреблением воды: химическую металлизацию; гальваническую металлизацию; магнетронное и ионно-плазменное напыления и др.

Наиболее распространенным (типовым) электролитом, применяемым в производстве печатных плат и при нанесении гальванических покрытий, является электролит на основе тартрата натрия ($\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$) в щелочной среде в присутствии аммоний-иона. При соотношении $\text{Cu}^{2+} : \text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 = 1 : 1-1 : 4$ образуются тартратные комплексы $[\text{Cu}(\text{OH})_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6]^{2-}$ и $[\text{Cu}(\text{OH})_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6]^0$, а в присутствии аммоний-иона — $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$. К основным преимуществам использования комплексного электролита (КЭ) относят его высокую устойчивость, возможность использования растворов с меньшей концентрацией по иону металла, хорошую рассеивающую способность, а также высокое качество получаемых покрытий [1, 3]. Высокая устойчивость КЭ в широком диапазоне значений pH обуславливает трудность их удаления из сточных вод. С учетом этого «традиционный» метод очистки осаждением в форме нерастворимых соединений в диапазоне значений pH 8,0–10,0 для таких электролитов неприменим [3, 4].

Цель работы — оценка возможности очистки содержащих КЭ сточных вод с использованием различных физико-химических методов.

Методика эксперимента. В качестве объекта исследования выбран модельный раствор (внесение комплексного медьсодержащего электролита в дистиллированную воду в соотношении 1 : 1000), имитирующий реальную сточную воду, с содержанием CuNH_3 -тартрата в пересчете на медь (II) 100 мг/л, рН $10,0 \pm 0,1$, в условиях максимальной устойчивости комплекса [3]. Примененные методы очистки: коагуляция; электрокоагуляция; окислительная деструкция; адсорбция.

Эффективность очистки

$$\Xi_o = \frac{C_{\text{исх}} - C_o}{C_{\text{исх}}} \cdot 100 \%,$$

где $C_{\text{исх}}$, C_o — концентрация меди в исходной и очищенной воде, мг/л.

Процесс коагуляции изучали с использованием флокулятора *VELP*, время быстрого смешения 2 мин, хлопьеобразование 8 мин, после отстаивания в течение 30 мин. В качестве коагулянтов использованы $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeSO_4 , FeCl_3 [5, 6], а также альтернативный коагулянт титанилсульфат TiOSO_4 , обладающий по данным, приведенным в [7–11], высокими коагуляционными свойствами.

Процесс электрокоагуляции проводили на стальных электродах (Ст3) при напряжении 10...15 В и плотности тока 0,5...3,0 А/дм² в течение 5 мин. Материал электрода выбран с учетом максимальной экономичности процесса, а также на основании данных об эффективности коагуляции аммиачно-тарtratных комплексов меди в воде солями железа (II).

Процессы окислительной деструкции проводили следующим образом: к заданному объему модельного раствора добавляли реагенты H_2O_2 (30 %); смесь H_2O_2 (30 %) с FeSO_4 (1 %) в мольном соотношении 1 : 10; HClO (7 %); смесь HClO (7 %) с H_2O_2 (30 %) в мольном соотношении 1 : 1. Время интенсивного перемешивания 5 мин.

В некоторых случаях окислительные методы совмещали с УФ-обработкой. Для этого использовали змеевиковую ртутно-кварцевую УФ-лампу низкого давления мощностью 8 Вт (длина волны 254 нм) с интенсивностью излучения 0,025 Вт/см². Для эксперимента использовали модельный раствор КЭ объемом 100 мл. Модельный раствор перемешивали с окислительными реагентами на магнитной мешалке и с использованием перистальтического насоса пропускали через змеевик-облучатель со скоростью 10 мл/мин. Время контакта 30 с. После прохождения через кварцевую УФ-лампу раствор собирали в мерную колбу.

Процесс сорбционной (ионообменной) доочистки проводили следующим образом: в модельный раствор вносили заданную навеску предварительно набухшего реагента и перемешивали в течение 60 мин.

Полученные в результате экспериментов образцы фильтровали через мембранный фильтр «Владипор» и определяли остаточное содержание ионов меди на атомно-эмиссионном спектрометре с магнитной плазмой «Спектроскай».

Результаты и их обсуждение. На первом этапе эксперимента исследован процесс коагуляции — как наиболее распространенный и эффективный метод очистки сточных вод, используемый на большинстве локальных очистных сооружений. Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

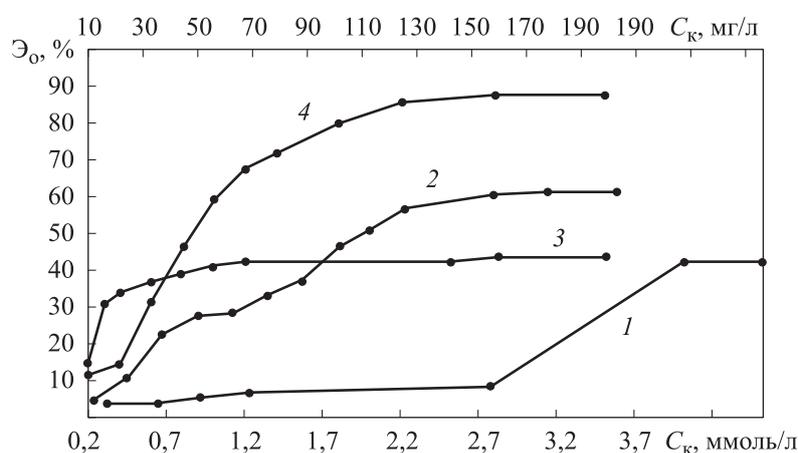


Рис. 1. Зависимость эффективности очистки коагуляцией от концентрации коагулянта $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (1), FeCl_3 (2), FeSO_4 (3), TiOSO_4 (4)

Согласно построенным кривым, титанилсульфат позволяет с высокой эффективностью удалять из воды ионы меди (II), несмотря на их комплексную форму. Использование традиционных коагулянтов снижает концентрацию ионов меди примерно на 30...50 %, что свидетельствует об их низкой активности в заданных условиях.

В результате экспериментов установлено, что титанилсульфат имеет высокую коагуляционную эффективность (90 %) в отношении тартратного комплекса меди по сравнению с эффективностью традиционных коагулянтов. Это можно объяснить процессами взаимной нейтрализации положительного заряда на поверхности аммиачно-тартратного комплекса меди (II) и отрицательного заряда на поверхности продуктов гидролиза титанилсульфата [5, 6], а также флокуляцией с их участием [17, 18].

Второй этап эксперимента — оценка эффективности процесса электрокоагуляции. Образование на аноде активного кислорода может привести к окислению аммиачно-тарtratного лиганда и снижению стабильности электролита. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

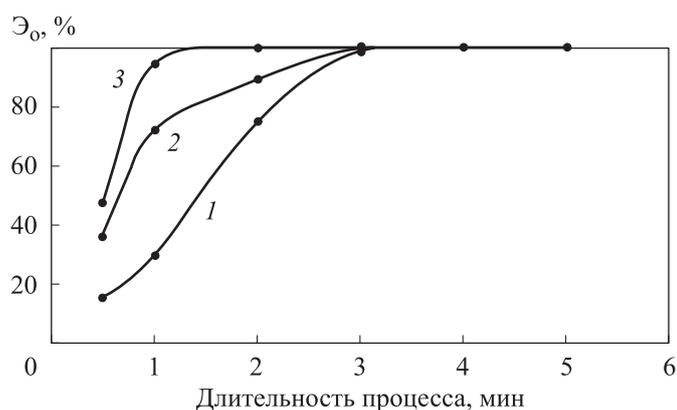


Рис. 2. Зависимость эффективности очистки электрокоагуляцией от длительности процесса при силе тока 1,0 (1), 2,0 (2) и 3,0 А (3)

Согласно полученным данным, процесс электрокоагуляции с использованием железных электродов позволяет с высокой эффективностью удалять из воды ионы меди (до 100 %). Повышенная эффективность процесса электрокоагуляции обусловлена процессами окисления органического лиганда, выделяющегося в процессе электролиза кислородом. В промышленных условиях возможно сочетание коагуляции солями титана с окислением, например, в процессе электрофлотационной очистки [19, 20]. Основным недостатком метода — высокие энергозатраты. Кроме того, возможно образование взрывоопасной смеси (H_2/O_2) в помещении очистных сооружений.

Основываясь на результатах эксперимента и возможности влияния кислорода на окисление комплекса в процессе электрокоагуляции было сформулировано предположение об эффективности окислительных методов очистки сточных вод от комплексных электролитов [12–14]. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Окислительные процессы, основанные на реактиве Фентона (в том числе фото-фентон-процесс), способны эффективно (до 99 %) удалять из воды тарtratные комплексы меди. Достаточно высокую эффективность (98 %) показало сочетание $HClO$ и H_2O_2 . Несмотря на высокую эффективность, перечисленные методы требуют значительных реагентных за-

трат, следовательно, эти методы необходимо использовать для доочистки сточных вод, прошедших стадию физико-химической очистки с использованием коагулянтов.

Эффективность очистки с использованием окислительных технологий

Метод очистки	Окислительный реагент	Эффективность очистки, %
Окислительная деструкция	H_2O_2	3,8
	$H_2O_2 + FeSO_4$ — реактив Фентона	90,4
	$HClO$	47,4
	$H_2O_2 + HClO$	97,6
Совмещение окислительной деструкции с УФ-обработкой	H_2O_2	3,8
	$H_2O_2 + FeSO_4$ — реактив Фентона	98,7

Третьим и заключительным этапом большинства систем очистки сточных вод является сорбционная доочистка. В рамках эксперимента оценена эффективность различных адсорбентов в процессе удаления из воды аммиачно-тарtratных комплексов меди (II) [15, 16]. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

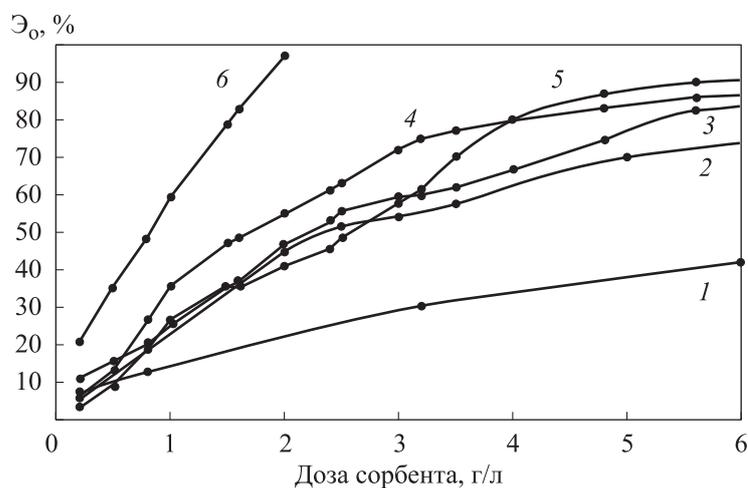


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки от дозы сорбента:
 1 — активированный уголь ОУ-А (ГОСТ 4453–74); 2 — активированный уголь *Extrasorb* GAC 12×40; 3 — минеральный сорбент АТМ; 4 — ионообменная смола КУ 2-8 (ГОСТ 20298–74); 5 — активированный уголь БАУ (ГОСТ 6217–74); 6 — активированный уголь *Extrasorb* OU

При низкой дозе адсорбента эффективность очистки низка, увеличение дозы сорбента позволяет достичь высокой степени очистки. Однако, учитывая высокую стоимость сорбентов, представляется возможным использовать сорбционную очистку на последней стадии очистки при малых концентрациях меди (II) для достижения нормативных показателей. При этом необходимо решить вопрос регенерации меди из адсорбентов, а также утилизации отработанных углей.

Заключение. На основании полученных результатов предложена схема очистки сточных вод гальванического производства, загрязненных аммиачно-тарtratными комплексами: коагуляция с использованием соединений титана с последующей доочисткой на основе системы Фентона. Очищенная вода может быть направлена на городские сооружения глубокой биологической очистки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Брусницына Л.А., Степановских Е.И. Технология изготовления печатных плат. Екатеринбург, Изд-во УрФУ, 2015.
- [2] Шалкаускас М., Вашкялис А. Химическая металлизация пластмасс. Л., Химия, 1985.
- [3] Симанова С.А., ред. Новый справочник химика и технолога. Химическое равновесие. Свойства растворов. СПб., Профессионал, 2004.
- [4] Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. М., Глобус, 2002.
- [5] Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М., АСВ, 2008.
- [6] Бабенков Е.Д. Очистка воды коагулянтами. М., Наука, 1977.
- [7] Wu Y.-F., Liu W., Gao N.-Y., et al. A study of titanium sulfate flocculation for water treatment. *Water Res.*, 2011, vol. 45, iss. 12, pp. 3704–3711.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.023>
- [8] Xu J., Zhao Y., Gao B., et al. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2018, vol. 25, no. 13, pp. 13147–13158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1482-8>
- [9] Izmailova N.L., Lorentson A.V., Chernoberezhskii Y.N. Composite coagulant based on titanium sulfate and aluminum sulfate. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2015, vol. 88, no. 3, pp. 458–462. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427215030155>
- [10] Кузин Е.Н., Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю. и др. Очистка сточных вод гальванического производства с использованием комплексных коагулянтов-восстановителей. *Цветные металлы*, 2019, № 10, с. 91–96.
DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.15>

- [11] Okour Y., Shon H.K., El Saliby I. Characterization of titanium tetrachloride and titanium sulfate flocculation in wastewater treatment. *Water Sci. Technol.*, 2009, vol. 59, iss. 12, pp. 2463–2473. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.254>
- [12] Alcalá-Delgado A.G., Lugo-Lugo V., Linares-Hernández I., et al. Industrial wastewater treated by galvanic, galvanic Fenton, and hydrogen peroxide systems. *J. Water Process. Eng.*, 2018, vol. 22, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.001>
- [13] Nidheesh P.V., Gandhimathi R. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: an overview. *Desalination*, 2012, vol. 299, pp. 1–15. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.011>
- [14] Aziz A.R.A., Asaithambi P., Daud W.A.W. Combination of electrocoagulation with advanced oxidation processes for the treatment of distillery industrial effluent. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2016, vol. 99, pp. 227–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.11.010>
- [15] Колесников В.А., Колесникова О.Ю., Нистратов А.В. и др. Комплексный подход к обезвреживанию сточных вод, содержащих ионы меди и лиганды. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2019, т. 62, № 2, с. 108–114. DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196202.5779>
- [16] Бурминова В.С., Нистратов А.В., Клушин В.Н. Равновесие ионообменного извлечения медьорганических комплексов из промывных вод. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2018, т. 61, № 1, с. 96–101. DOI: <https://doi.org/10.6060/tcct.20186101.5563>
- [17] Wang T.-H., Navarrete-López A.M., Li S., et al. Hydrolysis of $TiCl_4$: initial steps in the production of TiO_2 . *J. Phys. Chem. A.*, 2010, vol. 114, iss. 28, pp. 7561–7570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp102020h>
- [18] Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. М., Академкнига, 2007.
- [19] Мешалкин В.П., Колесников А.В., Савельев Д.С. Анализ физико-химической эффективности электрофлотационного процесса извлечения продуктов гидролиза четыреххлористого титана из техногенных стоков. *ДАН*, 2019, т. 486, № 6, с. 680–684.
- [20] Колесников А.В., Савельев Д.С., Колесников В.А. и др. Электрофлотационное извлечение высокодисперсного диоксида титана TiO_2 из водных растворов электролитов. *Стекло и керамика*, 2018, № 6, с. 32–36.

Фадеев Андрей Борисович — аспирант кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Кузин Евгений Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Кручинина Наталия Евгеньевна — д-р техн. наук, профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующая кафедрой промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Носова Татьяна Игоревна — студентка кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Костылева Елена Валерьевна — канд. хим. наук, доцент кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фадеев А.Б., Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. и др. Оценка эффективности методов очистки сточных вод гальванического производства от аммиачно-тарtratных комплексов меди (II). *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 5 (92), с. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-5-97-108>

**ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF METHODS
FOR ELECTROPLATING WASTEWATER PURIFICATION
FROM AMMONIUM-TARTRATE COPPER (II) COMPLEXES**

A.B. Fadeev

fadeev89@mail.ru

E.N. Kuzin

e.n.kuzin@muctr.ru

N.E. Kruchinina

krutch@muctr.ru

T.I. Nosova

nti16041998@gmail.com

E.V. Kostyleva

elenkostyleva@gmail.com

**D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

Wastewater purification from heavy metal compounds is a complex and urgent task. One of the main sources of pollution of the environment with ions of heavy metals is the wastewater, i.e., washing, of the electroplating processes. Complex electrolytes based on copper compounds are stable in a wide pH range and, when released into water, cannot be removed by the traditional methods, such as neutralization and precipitation. The study estimated the efficiency of various

Keywords

Complex electrolyte, water purification, coagulation, adsorption, destruction

methods of physicochemical water purification for removing complex ammonia-tartrate copper (II) complexes from water. Findings of research show that titanyl sulfate is most effective in water purification using coagulants. The efficiency of purification with the use of titanium compounds reaches 85 %, which is on average 30–40 % higher than when using traditional coagulants based on aluminum or iron compounds. Electrocoagulation processes make it possible to effectively remove complex copper compounds from water due to a combination of the processes of organic component oxidation and coagulation with iron salts. It was found that advanced oxidation processes, which are based on the reaction with a hydroxyl radical, using hydrogen peroxide, i.e., Fenton processes, make it possible to purify wastewater from copper compounds by 99.9 %. Despite the high efficiency, it is advisable to use adsorption processes only at the stage of additional water purification from previously coagulated and oxidized pollutants

Received 13.05.2020

Accepted 15.06.2020

© Author(s), 2020

The work was carried out as part of the program to support young research teaching fellows of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (no. Z-2020-013)

REFERENCES

- [1] Brusnitsyna L.A., Stepanovskikh E.I. Tekhnologiya izgotovleniya pechatnykh plat [Manufacturing technology for printed circuit boards]. Ekaterinburg, UFU Publ., 2015.
- [2] Shalkauskas M., Vashkyalis A. Khimicheskaya metallizatsiya plastmass [Chemical metallization of plastic]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985.
- [3] Simanova S.A., ed. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Khimicheskoe ravновесие. Svoystva rastvorov [A new handbook of chemist. Chemical equilibrium. Properties of solutions]. St. Petersburg, Professional Publ., 2004.
- [4] Vinogradov S.S. Ekologicheski bezopasnoe gal'vanicheskoe proizvodstvo [Environmentally friendly galvanic manufacture]. Moscow, Globus Publ., 2002.
- [5] Getmantsev S.V., Nechaev I.A., Gandurina L.V. Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod koagulyantami i flokulyantami [Industrial wastewater purification by coagulants and flocculants]. Moscow, ASV Publ., 2008.
- [6] Babenkov E.D. Ochistka vody koagulyantami [Water purification by coagulants]. Moscow, Nauka Publ., 1977.
- [7] Wu Y.-F., Liu W., Gao N.-Y., et al. A study of titanium sulfate flocculation for water treatment. *Water Res.*, 2011, vol. 45, iss. 12, pp. 3704–3711.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.023>

- [8] Xu J., Zhao Y., Gao B., et al. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2018, vol. 25, no. 13, pp. 13147–13158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1482-8>
- [9] Izmailova N.L., Lorentson A.V., Chernoberezhskii Yu.N. Composite coagulant based on titanium sulfate and aluminum sulfate. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2015, vol. 88, no. 3, pp. 458–462. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427215030155>
- [10] Kuzin E.N., Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., et al. Wastewater purification of galvanic production using complex coagulant reducing agents. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2019, no. 10, pp. 91–96 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.15>
- [11] Okour Y., Shon H.K., El Saliby I. Characterization of titanium tetrachloride and titanium sulfate flocculation in wastewater treatment. *Water Sci. Technol.*, 2009, vol. 59, iss. 12, pp. 2463–2473. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.254>
- [12] Alcalá-Delgado A.G., Lugo-Lugo V., Linares-Hernández I., et al. Industrial wastewater treated by galvanic, galvanic Fenton, and hydrogen peroxide systems. *J. Water Process. Eng.*, 2018, vol. 22, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.001>
- [13] Nidheesh P.V., Gandhimathi R. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: an overview. *Desalination*, 2012, vol. 299, pp. 1–15. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.011>
- [14] Aziz A.R.A., Asaithambi P., Daud W.A.W. Combination of electrocoagulation with advanced oxidation processes for the treatment of distillery industrial effluent. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2016, vol. 99, pp. 227–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.11.010>
- [15] Kolesnikov V.A., Kolesnikova O.Yu., Nistratov A.V., et al. Integrated approach to neutralization of wastewater containing copper ions and EDTA ligand. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology], 2019, vol. 62, no. 2, pp. 108–114 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196202.5779>
- [16] Burminova V.S., Nistratov A.V., Klushin V.N. Equilibrium of ion-exchange extraction of copper-organic complexes from rinsing water. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology], 2018, vol. 61, no. 1, pp. 96–101 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.6060/tcct.20186101.5563>
- [17] Wang T.-H., Navarrete-López A.M., Li S., et al. Hydrolysis of TiCl₄: initial steps in the production of TiO₂. *J. Phys. Chem. A.*, 2010, vol. 114, iss. 28, pp. 7561–7570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp102020h>
- [18] Shabanova N.A., Popov V.V., Sarkisov P.D. *Khimiya i tekhnologiya nanodispersnykh oksidov* [Chemistry and technology of nanodispersed oxides]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007.
- [19] Meshalkin V.P., Kolesnikov A.V., Savelyev D.S. The analysis of physical and chemical efficiency of electroflotation process the removing products of hydrolysis titanium tetrachloride from technogenic effluents. *Doklady AN*, 2019, vol. 486, no. 6, pp. 680–684 (in Russ.).

[20] Kolesnikov A.V., Savelyev D.S., Kolesnikov V.A., et al. Electroflotation extraction of high disperse titania TiO_2 from water solutions of electrolytes. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2018, no. 6, pp. 32–36 (in Russ.).

Fadeev A.B. — Post-Graduate Student, Department of Industrial Ecology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Kuzin E.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Ecology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Kruchinina N.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Industrial Ecology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Nosova T.I. — Student, Department of Industrial Ecology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Kostyleva E.V. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Industrial Ecology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fadeev A.B., Kuzin E.N., Kruchinina N.E., et al. Estimation of the efficiency of methods for electroplating wastewater purification from ammonium-tartrate copper (II) complexes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 5 (92), pp. 97–108 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-5-97-108>

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
press@bmstu.ru
<https://bmstu.press>

Подписано в печать 01.10.2020

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 9,5

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
baumanprint@gmail.com