

Е. А. Ермолаева, А. Ф. Дресвянников, М. Е. Колпаков,
Ю. Р. Пылыгалов

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ РЕЗОРЦИНА В КОАКСИАЛЬНОМ БЕЗДИАФРАГМЕННОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ

Ключевые слова: резорцин, щелочная среда, электрохимическая деструкция.

Процессы непрямого окисления органических субстратов пероксидом водорода, генерируемым *in situ* катодным восстановлением кислорода на различных электродах, перспективны при очистке промышленных сточных вод от органических токсикантов. Метод непрямого электрохимического окисления предполагает безопасную очистку загрязненной воды, минуя стадию выделения окислителя в чистом виде, за счет участия активных форм кислородсодержащих соединений в виде интермедиатов $\text{HO}^\cdot$, $\text{HO}_2^\cdot$. Под их воздействием и электрического тока разрушаются молекулы ароматических веществ с образованием простых соединений без формирования осадков. Одним из таких соединений является резорцин (1,3-дигидроксibenзол), применяемый в медицине, химической промышленности и косметологии. Он проникает в окружающую среду, как часть промышленных отходов. При контакте с кожей или слизистыми оболочками человека может вызывать раздражение, а при длительном воздействии - более серьезные нарушения здоровья: трансформирует структуру гемоглобина, поражает глаза и кожу. В ходе электролиза имеет место постоянное генерирование активных частиц (радикалов) на катоде в щелочном растворе электролита, при этом они активно взаимодействуют с молекулами резорцина и промежуточными продуктами окисления. Уменьшение значений оптической плотности в видимой области спектра указывает на разрушение конъюгированной системы. Согласно литературным данным, окисляясь, резорцин превращается в промежуточные карбоновые продукты. Превращение молекул подтверждается и данными тонкослойной хроматографии.

Е. А. Ermolaeva, A. F. Dresvyannikov, M. E. Kolpakov,
Yu. R. Polygalov

ELECTROCHEMICAL DESTRUCTION OF RESORCINOL IN A COAXIAL DIAPHRAGM-FREE ELECTROLYSER

Keywords: resorcinol, alkaline medium, electrochemical destruction.

The processes of indirect oxidation of organic substrates with hydrogen peroxide generated *in situ* by cathodic reduction of oxygen on various electrodes are promising in the treatment of industrial wastewater from organic toxicants. The method of indirect electrochemical oxidation involves the safe purification of contaminated water, bypassing the stage of oxidizer release in its pure form, due to the participation of active forms of oxygen-containing compounds in the form of intermediates $\text{HO}^\cdot$, $\text{HO}_2^\cdot$. Under their influence and electric current, aromatic molecules are destroyed to form simple compounds without precipitation formation. One of these compounds is resorcinol (1,3-dihydroxybenzene), used in medicine, chemical industry and cosmetology. It penetrates into the environment as part of industrial waste. In contact with human skin or mucous membranes, it can cause irritation, and with prolonged exposure, more serious health problems. During electrolysis, active particles (radicals) are constantly generated at the cathode in an alkaline electrolyte solution, while they actively interact with resorcinol molecules and intermediate oxidation products. A decrease in the optical density values in the visible region of the spectrum indicates the destruction of the conjugated system. According to the literature, when oxidized, resorcinol is converted into intermediate carboxylic products. The transformation of molecules is also confirmed by thin-layer chromatography data.

Введение

Резорцин (1,3-дегидроксibenзол) - многофункциональное соединение, которое находит широкое применение в медицине, химической промышленности и косметологии.

Сточные воды, содержащие резорцин, представляют серьезную экологическую опасность, поскольку он является токсичным веществом, которое может оказывать негативное воздействие на водные экосистемы и здоровье человека.

При попадании в водоемы резорцин может накапливаться в водных организмах, вызывая нарушения их жизнедеятельности и репродуктивной функции. Он способен вызывать острые и хронические отравления у рыб и других водных обитателей даже при относительно низких концентрациях.

Резорцин обладает способностью к биоаккумуляции в пищевых цепях, что может привести к увеличению его концентрации на каждом трофическом уровне. При контакте с кожей или слизистыми оболочками человека может вызывать раздражение, а при длительном воздействии - более серьезные нарушения здоровья.

Особую опасность представляет способность резорцина к образованию токсичных соединений при взаимодействии с другими веществами в водной среде. При хлорировании воды могут образовываться хлорпроизводные резорцина, обладающие еще более высокой токсичностью.

Для предотвращения загрязнения окружающей среды необходима тщательная очистка промышленных сточных вод от резорцина перед их сбросом. Применяются различные методы очистки,

включая физико-химические и биологические способы обработки стоков.

Для полного удаления органических веществ из промышленных стоков в ряде случаев рекомендуется применять перспективные электрохимические окислительные процессы [1-13]. По техническому исполнению эти процессы подразделяют на прямой и непрямой электролиз [13-17].

Прямой электролиз основан на деструкции веществ-загрязнителей прямым окислением на электроде, или их химической реакцией с электрогенерированными частицами, адсорбирующимися на электроде [13-15, 18-20].

При непрямом электролизе разрушение веществ органической природы протекает в объеме раствора реакционно-активными формами сильных окислителей - пероксидом водорода, гидроксид- и гидроксипероксид-радикалами [13-16, 18], генерированными на электроде [14, 15, 21]. Процессы непрямого окисления органических субстратов пероксидом водорода, генерируемым *in situ* катодным восстановлением кислорода на углеродистых газодиффузионных электродах, благодаря своей простоте и экологичности, имеют перспективу, как для получения новых соединений (непрямой электросинтез), так и для очистки сточных вод от органических токсикантов (минерализация) [15, 17, 22-26]. Их сущность заключается в электрохимической генерации на катоде пероксида водорода из кислорода – гетерогенная стадия, и в последующих химических реакциях его интермедиатов с органическими субстратами в растворе электролита - гомогенная стадия [3, 15, 17, 22, 23, 27].

В отличие от прямого электрохимического окисления органических субстратов, в котором практически всегда возникают проблемы коррозионной стойкости электродных материалов, термодинамической устойчивости водных растворов электролитов и осмоления продуктов на поверхности электродов, при непрямом окислении такие вопросы не возникают. Это обусловлено тем, что процессы генерации окислителей протекают при сравнительно невысоких электродных потенциалах, а химические реакции протекают в гомогенной среде [13-15, 24, 25, 28].

Метод непрямого электрохимического окисления предполагает безопасную очистку загрязненной воды, минуя стадию выделения окислителя в чистом виде, за счет участия активных форм кислородсодержащих соединений в виде интермедиатов $\text{HO}^\bullet$, $\text{HO}_2^\bullet$. Под их воздействием и электрического тока разрушаются молекулы ароматических веществ с образованием простых соединений без формирования осадков. Однако малоизученность их влияния на трудноокисляемые органические соединения выдвигает задачу детального изучения процессов электрохимической деструкции последних [29].

В этой связи целью работы является оценка возможности полной деструкции 1,3-дигидроксibenзола, выбранного в качестве объекта исследования, в щелочной среде с помощью непрямого электрохимического окисления.

Экспериментальная часть

В ходе исследования проведено не прямое электрохимическое окисление резорцина при низких концентрациях в коаксиальном бездиафрагменном электролизере с существенным различием площадей электродов.

Экспериментальная установка включала источник постоянного тока и коаксиальную бездиафрагменную электрохимическую ячейку с емкостью рабочей камеры 400 см³. Катод ячейки изготовлен из стали X18H10T диаметром 1,0 мм, анодом является сетчатый электрод ОРТА. Предварительная подготовка электродов заключалась в обезжиривании в растворе соды с последующей промывкой дистиллированной водой.

Фоновым электролитом служил раствор NaOH.

Электрохимическую деструкцию проводили при различных условиях: катодная плотность тока 2,7-9,7 кА/м², напряжение 10-30 В. Концентрация 1,3-дигидроксibenзола варьировалась в пределах: 0,25-0,50 мМ.

Оценку степени удаления органических соединений из раствора осуществляли посредством спектров поглощения в УФ-видимой области в разные моменты времени электролиза. Кроме того, для контроля применяли метод тонкослойной хроматографии.

Обсуждение результатов

Динамику процесса деструкции изучали комплексно: путем визуального наблюдения за обесцвечиванием раствора (рис.1), а также количественно с использованием спектрофотометрического метода и метода тонкослойной хроматографии.



Рис. 1 – Фотографии модельных растворов при непрямом электрохимическом окислении резорцина

Fig. 1 – Photographs of model solutions during indirect electrochemical oxidation of resorcinol

Полученные результаты исследования показали, что увеличение концентрации NaOH в электролите до 0,04 М приводит к существенному снижению рабочего напряжения с 30 до 10 В. Данный эффект может быть объяснен повышением электропроводности раствора за счет роста концентрации ионов OH^- и Na^+ , что снижает омическое сопротивление электролита. Важно отметить, что при таком значительном снижении напряжения не наблюдалось заметного повышения температуры раствора, что является благоприятным фактором с точки зрения энергоэффективности процесса. Наблюдаемая зависимость хорошо согласуется с литературными данными [30].

Однако, несмотря на очевидные энергетические преимущества использования более концентрированных растворов щелочи, следует учитывать их влияние на эффективность процесса деструкции. Известно, что стабильность H_2O_2 в растворе NaOH (0,01 М) весьма низкая, в то время как реакционная способность высока (табл.1). Соответственно, концентрация щелочи в растворе влияет на стабильность электрогенерированных активных частиц, в данном случае - гидроксид радикала [30]. Таким образом, использование 0,01 М раствора NaOH представляется оптимальным компромиссом между энергетическими затратами и эффективностью процесса деструкции, обеспечивая высокую реакционную способность образующихся активных частиц.

Таблица 1 – Константы скорости разложения пероксида водорода и реакционная способность в щелочной среде [30]

Table 1 – Hydrogen peroxide decomposition rate constants and reactivity in alkaline medium [30]

C(NaOH), моль/л	Kv разложения H_2O_2	Стабильность H_2O_2	Реакционная способность
0,5	0,06	высокая	низкая
0,1	0,18	относительно высокая	относительно низкая
0,005	0,24	низкая	высокая

В процессе электролиза происходит непрерывное генерирование активных частиц (радикалов) на поверхности катода, которые диффундируют в объем электролита. Эти высокореакционноспособные частицы вступают в интенсивное взаимодействие как с молекулами исходного резорцина, так и с образующимися промежуточными продуктами его окисления. Эффективность данного процесса подтверждается спектрофотометрическими исследованиями. Наблюдаемое уменьшение значений оптической плотности в видимой области спектра (рис.2) является прямым доказательством разрушения сопряженной системы двойных связей в ароматическом кольце резорцина. Это свидетельствует о глубокой деструкции молекулы с раскрытием ароматического кольца и образованием алифатических интермедиатов.

После начала электролиза наблюдается резкое увеличение оптической плотности (при $\lambda = 280\text{--}320\text{ нм}$), что свидетельствует об образовании новых

соединений, а в течение последующих 4 часов их содержание уменьшается (рис.2).

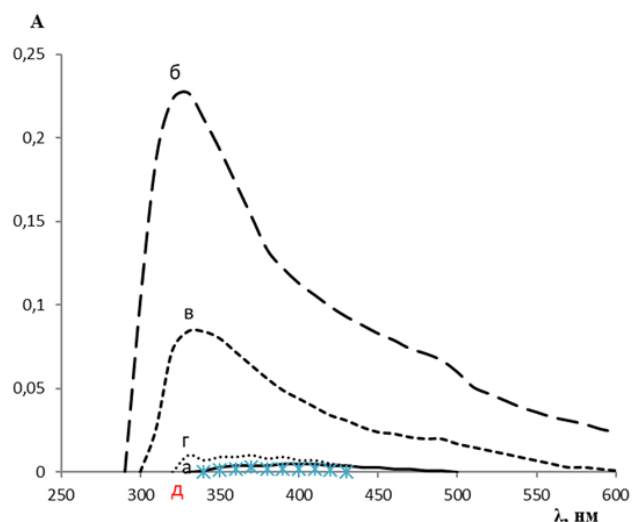


Рис. 2 – Спектры поглощения ($l=20\text{ мм}$) модельных растворов, содержащих резорцин (0,25 мМ) в фоновом растворе NaOH (0,01 М), в зависимости от времени электролиза (0,7 А, 30 В, 9,7 кА/м², анод ОРТА), ч: а – 0; б – 1; в – 2; г – 3; д – 4

Fig. 2 – Absorption spectra ($l=20\text{ mm}$) of model solutions containing resorcinol (0.25 mM) in NaOH background solution (0.01 M) as a function of electrolysis time (0.7 A, 30 V, 9.7 kA/m², anode ORTA), h: a - 0; b - 1; c - 2; d - 3; e - 4

Постепенное снижение интенсивности поглощения (рис.2) также указывает на последовательный характер окислительной деструкции, где каждая стадия сопровождается изменением электронной структуры образующихся соединений. Такой механизм деструкции является типичным для электрохимического окисления ароматических соединений в водных растворах.

Методом тонкослойной хроматографии было установлено, что полная электрохимическая деструкция резорцина достигается через 2 часа проведения процесса как для исходных концентраций 0,25 мМ, так и 0,5 мМ. По истечении этого времени хроматографический анализ показал отсутствие пикта, соответствующего резорцину, что свидетельствует о его полном окислении в растворе. Важно отметить, что одинаковое время деструкции для растворов с различной исходной концентрацией резорцина может указывать на достаточную эффективность выбранных условий электролиза и отсутствие лимитирующего влияния концентрации субстрата в исследованном диапазоне. Полученные результаты также позволяют предположить, что скорость процесса деструкции определяется преимущественно электрохимическими параметрами системы, а не исходной концентрацией загрязнителя в указанном концентрационном интервале.

Анализ экспериментальных данных позволяет заключить, что процесс окисления резорцина в исследуемом растворе происходит поэтапно с образованием промежуточных соединений,

завершаясь формированием щавелевой кислоты как конечного продукта. На основании полученных результатов и литературных данных [31] на рис.3 предлагается механизм окислительной деструкции резорцина.

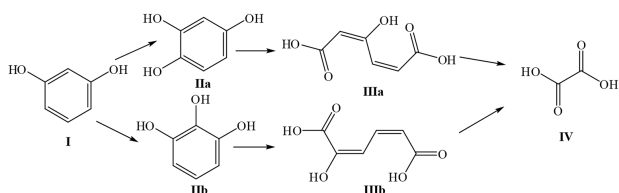


Рис. 3 – Схема окисления резорцина: I - резорцин, IIa - 1,2,4-тригидроксибензол, IIb - пирогаллол, IIIa - 2-гидроксигекса-2,4-диен-1,6-дикарбоновая кислота, IIIb - 3-гидроксигекса-2,4-диен-1,6-дикарбоновая кислота, IV - щавелевая кислота

Fig. 3 – Scheme of resorcinol oxidation: I - resorcinol, IIa - 1,2,4-trihydroxybenzene, IIb - pyrogallol, IIIa - 2-hydroxyhexa-2,4-diene-1,6-dicarboxylic acid, IIIb - 3-hydroxyhexa-2,4-diene-1,6-dicarboxylic acid, IV - oxalic acid

Таким образом, применение бездиафрагменного коаксиального электролизера с узкоцилиндрическим катодом и ОРТА-анодом позволяет проводить электролиз при катодной плотности тока 2,7-9,7 кА/м² щелочных растворов, содержащих резорцин, практически с полной деструкцией последнего.

Литература

1. C.S. Chiou, Y.H. Chen, C. T. Chang, C.Y. Chang, J.L. Shie, Y.S. Li, *J. Hazard. Mater.*, **135**, 1-3, 344-349 (2006).
2. A. Duran, J.M. Monteagudo, E. Amores, *Appl. Catal. B: Environ.*, **80**, 1-2, 42-50 (2008).
3. I. Sires, J.A. Garrido, R.M. Rodriguez, E. Brillas, N. Oturan, M.A. Oturan, *Appl. Catal. B: Environ.*, **72**, 3-4, 382-394 (2007).
4. E. Isarain-Chavez, C. Arias, P.L. Cabot, F. Centellas, R.M. Rodriguez, J.A. Garrido, E. Brillas, *Appl. Catal. B: Environ.*, **96**, 3-4, 361-369 (2010).
5. R. Jain, M. Shrivastava, *J. Hazard. Mater.*, **152**, 1, 216-220 (2008).
6. G. Mascolo, R. Ciannarella, L. Balest, A. Lopez, *J. Hazard. Mater.*, **152**, 3, 1138-1145 (2008).
7. У. Шамб, Ч. Сеттерфилд, С. Вендворс. *Перекись водорода*. Изд-во иностр. лит-ры, Москва, 1958. 578 с.
8. I. Peternel, N. Koprivanac, A.L. Bozic, H. Kusic, *J. Hazard. Mater.*, **148**, 1-2, 477-484 (2007).
9. N. Quici, M.E. Morgada, R.T. Gettar, M. Bolte, M.I. Litter, *Appl. Catal. B: Environ.*, **71**, 3-4, 117-124 (2007).
10. D. Rajkumar, K. Palanivelu, *J. Hazard. Mater.*, **113**, 1-3, 123-129 (2004).
11. J.H. Sun, S.P. Sun, M.H. Fan, H.Q. Guo, L.P. Qiao, R.X. Sun, *J. Hazard. Mater.*, **148**, 1-2, 172-177 (2007).
12. C.R. Costa, C.M. Botta, E.L. Espindola, P. Olivi, *J. Hazard. Mater.*, **153**, 1-2, 616-627 (2008).
13. A.O. Mehmet, B. Enric, *Portugaliae Electrochim. Acta*, **25**, 1, 1-18 (2007).
14. J.A. Garrido, E. Brillas, P.L. Cabot, F. Centellas, C. Arias, R.M. Rodriguez, *Portugaliae Electrochim. Acta*, **25**, 1, 19-41 (2007).
15. В.Л. Корниенко, Г.А. Колягин, *Рос. хим. журн.*, XLIX, **5**, 129-136 (2005).
16. S. Garcia-Segura, E. Brillas, *Appl. Catal. B: Environ.*, **72**, 3-4, 373-381 (2007).
17. В.Л. Корниенко, Г.В. Корниенко, Н.В. Чаенко, *Электрохимия*, **43**, 11, 1311-1316 (2007).
18. C. Comminellis, A. De Battisti, C. Pulgarin, M. Rodrigo, *Electrochemical oxygen transfer reaction on synthetic boron-doped diamond thin film electrode*. Lausanne, 2004. 197 p.
19. A. Kraft, M. Stadelmann, M. Blaschke, *J. Hazard. Mater.*, **103**, 3, 247-261 (2003).
20. K. Waterston, J.W. Wang, D. Bejan, N.J. Bunce, *J. Appl. Electrochem.*, **36**, 2, 227-232 (2005).
21. Пат. США 4.340.490 (1982)
22. C. Wang, J. Hu, W. Chou, Y. Kuo, *J. Hazard. Mater.*, **152**, 2, 601-606 (2008).
23. S. Hammami, N. Oturan, N. Bellakhal, *J. Electroanal. Chem.*, **610**, 1, 75-84 (2007).
24. Ю.В. Салтыков, В.Л. Корниенко, И.С. Васильева, *Электрохимия*, **37**, 11, 1401-1404 (2001).
25. Ю.В. Салтыков, В.Л. Корниенко, *Электрохимия*, **39**, 12, 1471-1475 (2003).
26. Пат. РФ 2002.117.023 (2004)
27. E. Guinea, C. Arias, P. L. Cabot, J. A. Garrido, R. M. Rodriguez, F. Centellas, E. Brillas, *Water Res.*, **42**, 1-2, 499-511 (2008).
28. C. Flox, S. Ammar, *Appl. Catal. B: Environ.*, **67**, 1-2, 93-104 (2006).
29. S.H. Kang, K. Jae-Yup, Y. Sung, *Electrochim. Acta*, **52**, 16, 5242-5250 (2007).
30. Г.В. Корниенко, Н.В. Чаенко, И.С. Васильева, В.Л. Корниенко, *Электрохимия*, **40**, 2, 175-179 (2004).
31. Г.В. Корниенко, Т.А. Кенова, В.Л. Корниенко, А.А. Кукушкин, *Журнал СВУ. Химия*, **14**, 1, 72-81 (2021).

References

1. C.S. Chiou, Y.H. Chen, C. T. Chang, C. Y. Chang, J.L. Shie, Y.S. Li, *J. Hazard. Mater.*, **135**, 1-3, 344-349 (2006).
2. A. Duran, J.M. Monteagudo, E. Amores, *Appl. Catal. B: Environ.*, **80**, 1-2, 42-50 (2008).
3. I. Sires, J.A. Garrido, R.M. Rodriguez, E. Brillas, N. Oturan, M.A. Oturan, *Appl. Catal. B: Environ.*, **72**, 3-4, 382-394 (2007).
4. E. Isarain-Chavez, C. Arias, P.L. Cabot, F. Centellas, R. M. Rodriguez, J. A. Garrido, E. Brillas, *Appl. Catal. B: Environ.*, **96**, 3-4, 361-369 (2010).
5. R. Jain, M. Shrivastava, *J. Hazard. Mater.*, **152**, 1, 216-220 (2008).
6. G. Mascolo, R. Ciannarella, L. Balest, A. Lopez, *J. Hazard. Mater.*, **152**, 3, 1138-1145 (2008).
7. Y. Schamb, C. Setterfield, S. Wendworth. *Hydrogen peroxide*. Izd-wo foreign lit. litt. r., Moscow, 1958. 578 c.
8. I. Peternel, N. Koprivanac, A.L. Bozic, H. Kusic, *J. Hazard. Mater.*, **148**, 1-2, 477-484 (2007).
9. N. Quici, M.E. Morgada, R.T. Gettar, M. Bolte, M.I. Litter, *Appl. Catal. B: Environ.*, **71**, 3-4, 117-124 (2007).
10. D. Rajkumar, K. Palanivelu, *J. Hazard. Mater.*, **113**, 1-3, 123-129 (2004).
11. J.H. Sun, S.P. Sun, M.H. Fan, H.Q. Guo, L.P. Qiao, R.X. Sun, *J. Hazard. Mater.*, **148**, 1-2, 172-177 (2007).
12. C.R. Costa, C.M. Botta, E.L. Espindola, P. Olivi, *J. Hazard. Mater.*, **153**, 1-2, 616-627 (2008).
13. A.O. Mehmet, B. Enric, *Portugaliae Electrochim. Acta*, **25**, 1, 1-18 (2007).
14. J.A. Garrido, E. Brillas, P.L. Cabot, F. Centellas, C. Arias, R.M. Rodriguez, *Portugaliae Electrochim. Acta*, **25**, 1, 19-41 (2007).
15. V.L. Kornienko, G.A. Kolyagin, *Ros. chem. zhurn*, XLIX, **5**, 129-136 (2005).
16. S. Garcia-Segura, E. Brillas, *Appl. Catal. B: Environ.*, **72**, 3-4, 373-381 (2007).
17. V.L. Kornienko, G.V. Kornienko, N.V. Chaenko, *Electrochemistry*, **43**, 11, 1311-1316 (2007).

18. C. Comninellis, A. De Battisti, C. Pulgarin, M. Rodrigo, *Electrochemical oxygen transfer reaction on synthetic boron-doped diamond thin film electrode*. Lausanne, 2004. 197 p.
19. A. Kraft, M. Stadelmann, M. Blaschke, *J. Hazard. Mater.*, **103**, 3, 247-261 (2003).
20. K. Waterston, J.W. Wang, D. Bejan. N.J. Bunce, *J. Appl. Electrochem.*, **36**, 2, 227-232 (2005).
21. U.S. Pat. USA 4,340,490 (1982)
22. C. Wang, J. Hu, W. Chou, Y. Kuo, *J. Hazard. Mater.*, **152**, 2, 601-606 (2008).
23. S. Hammami, N. Oturan, N. Bellakhal, *J. Electroanal. Chem.*, **610**, 1, 75-84 (2007).
24. Y.V. Saltykov, V.L. Kornienko, I.S. Vasilieva, *Electrochemistry*, **37**, 11, 1401-1404 (2001).
25. Y.V. Saltykov, V.L. Kornienko, *Electrochemistry*, **39**, 12, 1471-1475 (2003).
26. Pat. RF 2002.117.023 (2004).
27. E. Guinea, C. Arias, P. L. Cabot, J. A. Garrido, R. M. Rodriguez, F. Centellas, E. Brillas, *Water Res.*, **42**, 1-2, 499-511 (2008).
28. C. Flox, S. Ammar, *Appl. Catal. B: Environ.*, **67**, 1-2, 93-104 (2006).
29. S. H. Kang, K. Jae-Yup, Y. Sung, *Electrochim. Acta*, **52**, 16, 5242-5250 (2007).
30. G.V. Kornienko, N.V. Chaenko, I.S. Vasilieva, V.L. Kornienko, *Electrochemistry*, **40**, 2, 175-179 (2004).
31. G.V. Kornienko, T.A. Kenova, V.L. Kornienko, A.A. Kukushkin, *Journal of SFU. Chemistry*, **14**, 1, 72-81 (2021).

© **Е. А. Ермолаева** – канд. хим. наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества (АХСМК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, ErmolaevaEA@corp.knrtu.ru; **А. Ф. Дресвянников** – д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой технологии электрохимических производств (ТЭП), КНИТУ; **М. Е. Колпаков** – д-р хим. наук, профессор кафедры АХСМК, КНИТУ; **Ю. Р. Полюгалов** – аспирант кафедры ТЭП, КНИТУ.

© **E. A. Ermolaeva** - PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the Analytical Chemistry, Certification and Quality Management (ACCQM) department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, ErmolaevaEA@corp.knrtu.ru; **A. F. Dresvyannikov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Head of the Electrochemical Production Technologies (EPT) department, KNRTU; **M. E. Kolpakov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor of the ACCQM department, KNRTU; **Yu. R. Polygalov** – PhD-student of the EPT department, KNRTU.