

DOI: 10.17516/1998-2836-0217

УДК 541.135+547.0

## Electrocatalytic Resorcinol Oxidation by Active Oxygen forms in Situ Generated in Conjugate Reactions on Pt and Pb/PbO<sub>2</sub> Anodes and Mesostructured Carbon Cathode CMK-3

Galina V. Kornienko<sup>a,b</sup>, Tatyana A. Kenova<sup>a</sup>,  
Vasily L. Kornienko<sup>\*a</sup>, Aleksey A. Kukushkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS  
FRC «Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS»  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 22.01.2021, received in revised form 20.02.2021, accepted 11.03.2021

**Abstract.** Kinetics and selectivity of indirect electrocatalytic resorcinol oxidation by active oxygen forms (AOF) in situ generated from oxygen in gas diffusion electrode (GDE) mesostructured carbon CMK-3 and Pt, Pb/PbO<sub>2</sub> at different pH were studied. The high resorcinol oxidation process effectivity in both Pt-GDE at pH=10 (99 %) and Pb/PbO<sub>2</sub> + Fe<sup>2+</sup> at pH=2 (99 %) systems was shown; the resorcinol oxidation scheme was proposed.

**Keywords:** indirect electrocatalytic oxidation, active oxygen forms, resorcinol, mesostructured carbon, gas diffusion electrode, intermediates.

*Citation:* Kornienko G.V., Kenova T.A., Kornienko V.L., Kukushkin A.A. Electrocatalytic resorcinol oxidation by active oxygen forms in situ generated in conjugate reactions on Pt and Pb/PbO<sub>2</sub> anodes and mesostructured carbon cathode CMK-3, J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2021, 14(1), 72-81. DOI: 10.17516/1998-2836-0217

# Непрямое электрокаталитическое окисление резорцина активными формами кислорода, *in situ* генерированными в сопряженных реакциях на анодах из Pt и Pb/PbO<sub>2</sub> и катоде из мезоструктурированного углерода СМК-3

Г. В. Корниенко<sup>а,б</sup>, Т. А. Кенова<sup>а</sup>,  
В. Л. Корниенко<sup>а</sup>, А. А. Кукушкин<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН,  
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Сибирский государственный университет науки  
и технологии имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** Исследована кинетика и селективность непрямого электрокаталитического окисления резорцина активными формами кислорода (АФК), генерированными *in situ* из кислорода в газодиффузионном электроде (ГДЭ) на основе мезоструктурированного углерода СМК-3 и анодах из Pt и Pb/PbO<sub>2</sub> при различных pH. Показана высокая эффективность процесса окисления резорцина (99 %) в системе с ГДЭ и Pt при pH=10 в растворе 0.05 М NaOH: 0.5 М Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3:1), и Pb/PbO<sub>2</sub> + Fe<sup>2+</sup> при pH=2 (99 %) в растворе 0.5 М Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:0.1 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3:1), предложена схема его окисления.

**Ключевые слова:** не прямое электрокаталитическое окисление, активные формы кислорода, резорцин, мезоструктурированный углерод, газодиффузионный электрод, интермедиаты.

Цитирование: Корниенко, Г.В. Непрямое электрокаталитическое окисление резорцина активными формами кислорода, *in situ* генерированными в сопряженных реакциях на анодах из Pt и Pb/PbO<sub>2</sub> и катоде из мезоструктурированного углерода СМК-3 / Г.В. Корниенко, Т.А. Кенова, В.Л. Корниенко, А. А. Кукушкин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2021, 14(1). С. 72-81. DOI: 10.17516/1998-2836-0217

## Введение

Изомеры дигидроксибензола (гидрохинон, пирокатехин, резорцин) находят широкое применение в производстве красителей, каучуков, полимеров, используются в фармацевтической, пищевой, косметической и ряде других отраслей промышленности [1]. Сточные воды, содержащие производные фенола и/или продукты их деструкции, являются серьезной экологической проблемой, поскольку эти поллютанты большей частью относятся к трудно фото- и био-разлагаемым соединениям [2–4].

Традиционные методы очистки фенолсодержащих сточных вод, такие как химические, физические и биологические, имеют ряд существенных недостатков [5].

В этой связи инновационные процессы окисления («advanced oxidation processes» (AOPs)) все чаще рассматриваются как альтернативные способы очистки промышленных и муници-

пальных сточных вод, содержащих различные органические и неорганические поллютанты, очистки и дезинфекции питьевой воды, рекультивации загрязненных почв [2, 6–11].

Среди АОРs электрохимические методы обладают рядом преимуществ, поскольку в них используется «чистый реагент» – электрон. Они протекают в мягких условиях, со сравнительно высокими скоростями, контролируемые плотностью тока или потенциалом, не требуют сложного оборудования и легко автоматизируются [9].

Следует отметить, что в настоящее время электрохимические технологии рассматриваются в качестве перспективных для переработки биомассы с получением целевых продуктов с высокой добавленной стоимостью [12,13]. Эти процессы удовлетворяют большинству требований зеленой химии.

В основе АОРs лежит *in-situ* получение высокореакционных АФК (главным образом, •ОН-радикалов), участвующих в процессах окисления [14].

По способу получения •ОН-радикалов в электролитической системе можно выделить два вида электрохимических процессов: прямой и непрямой. В случае прямого электрохимического процесса образование •ОН-радикалов протекает на аноде за счет прямого разряда молекул воды, скорость получения и концентрация которых зависит от каталитической активности анодного материала (1).



К непрямому электрохимическому процессу обычно относят процессы с получением •ОН на основе реакции Фентона (2) (электро-Фентон, фото-электро-Фентон, соно-электро-Фентон и др.).



В этом случае требуется добавление или электрохимическая *in situ* генерация  $\text{H}_2\text{O}_2$  и  $\text{Fe}^{2+}$  [15].

В качестве модельного фенольного компонента сточных вод разрушение резорцина было исследовано с помощью химического ( $\text{HClO}$ ,  $\text{NH}_2\text{Cl}$ ,  $\text{KMnO}_4$ ) [16,17], каталитического [18], фотокаталитического [19] окисления, озонирования [20] и адсорбции [21]. В [22] было показано, что резорцин эффективно может быть окислен электрохимически на допированном бором алмазном электроде (ДБАЭ).

В данной работе исследовано электрокаталитическое окисление резорцина активными формами кислорода, *in situ* генерированными в сопряженных реакциях на анодах из Pt и Pb/PbO<sub>2</sub> и катоде из мезоструктурированного углерода СМК-3 при различных pH в бездиафрагменном электролизере. Изучено влияние материала анода, плотности тока, pH электролита на эффективность и кинетику процесса.

### Экспериментальная часть

Для получения  $\text{H}_2\text{O}_2$  и проведения электролиза с его участием *in situ* использовали термостатируемую ячейку с неразделенным катодным и анодным пространством. Газодиффузионные электроды изготавливали в виде 2-слойных дисков диаметром 30 мм по методике, описанной в [23]. Содержание фторопласта Ф-4Д в рабочем слое составляло 60 мас. %, в запорном слое –

50 мас. %. Для запорного слоя использовали ацетиленовую сажу марки А-437 Э, для рабочего слоя – мезоструктурированный углерод СМК-3. Текстуальные характеристики данного углеродного материала приведены в [24].

В качестве анодов применяли платиновую пластину и электрод из диоксида свинца (Pb/PbO<sub>2</sub>), изготовленный по методике, описанной в [25], площадь анодов составляла 2,5 см<sup>2</sup>. В качестве электрода сравнения использовали хлорид – серебряный электрод (ЭВЛ-1М1), относительно которого приведены все значения потенциала в статье. Объем ячейки 50 мл.

Окисление модельных растворов резорцина проводили при плотности тока в интервале от 25 до 100 мАсм<sup>-2</sup>. Исходные концентрации резорцина составляли 50 и 100 мг л<sup>-1</sup>. В работе использовали следующие электролиты: рН=2–0.5 М Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0.1 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3:1); рН=7–0.5 М Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; рН = 10–0.05 М NaOH: 0.5 М Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3:1), температура электролита составляла 20 °С. При окислении в электролите с рН=2 процесс проводили с добавлением сульфата железа С<sub>Fe<sup>2+</sup></sub> = 3,2 · 10<sup>-3</sup> мг л<sup>-1</sup>. Кислород в ГДЭ подавали с его тыльной стороны.

Анализ продуктов окисления резорцина проводили на приборе Shimadzu LC/MS-2002 с колонкой RAPTOR ARC-18 100. Хроматографирование образца осуществляли в изокритическом режиме в ацетонитриле. Для регистрации масс-спектров использовали квадрупольный масс-спектрометр с электронапылителем источником ионов (ESI) при прямом вводе образца и элюата, подаваемого хроматографом со скоростью 20 мкл/мин. Все электрохимические измерения проводили с помощью потенциостата ПИ 50–1.1 (ЗИП, г. Гомель, Республика Беларусь).

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены кинетические кривые окисления резорцина в кислом и щелочном электролитах в ячейке с платиновым анодом. Исходная концентрация резорцина 100 мг л<sup>-1</sup>.

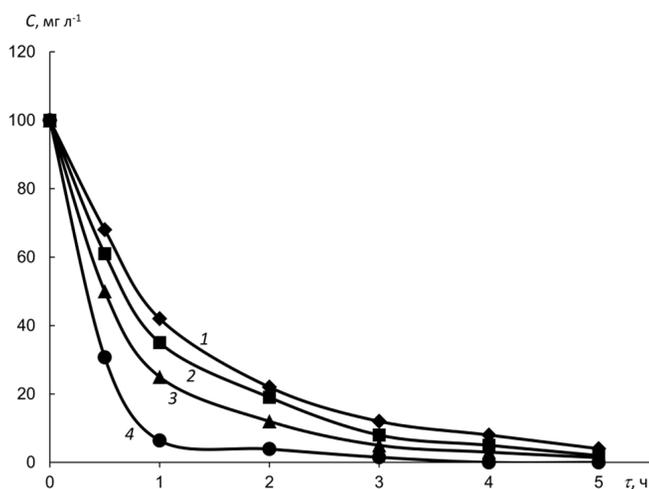
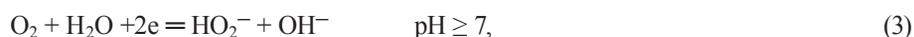


Рис. 1. Кинетические кривые окисления резорцина на Pt аноде в зависимости от рН при плотности тока 50 мАсм<sup>-2</sup> (1, 2) и 100 мАсм<sup>-2</sup> (3, 4): 1,3 – рН = 2 и 2,4 – рН = 10

Fig. 1. Kinetic curves of resorcinol oxidation on Pt anode versus pH at current density 50 mАсм<sup>-2</sup> (1, 2) and 100 mАсм<sup>-2</sup> (3, 4): 1,3 – pH = 2 and 2,4 – pH = 10

На рис. 1 видно, что как в щелочном, так и в кислом электролитах с увеличением плотности тока эффективность окисления резорцина возрастает. Наиболее значительно это наблюдается в течение первых двух часов работы ячейки. Так, в щелочном электролите за первый час электролиза эффективность окисления составила 60 % при плотности тока  $50 \text{ мАсм}^{-2}$  и 94 % – при  $100 \text{ мАсм}^{-2}$ . В кислом электролите за первый час электролиза эффективность составила 59 % при плотности тока  $50 \text{ мАсм}^{-2}$  и 60 % – при  $100 \text{ мАсм}^{-2}$ . Сравнение результатов показывает, что окисление резорцина в щелочном растворе при  $\text{pH} = 10$  протекает значительно эффективнее, чем в кислом. Это можно объяснить тем, что при электрохимическом восстановлении  $\text{O}_2$  в зависимости от  $\text{pH}$  раствора образуются различные по своей реакционной способности АФК:



На аноде протекает реакция окисления воды с образованием  $\text{HO}^\bullet$ -радикалов (1) [11].

В ячейке с неразделенным пространством электрогенерированный  $\text{H}_2\text{O}_2$  может быть окислен на аноде по реакциям (5, 6), давая в качестве интермедиата радикал  $\text{HO}_2^\bullet$  с меньшей окислительной способностью, чем  $\text{HO}^\bullet$ :



В щелочном растворе  $\text{HO}_2^-$  по условиям электропереноса будет переноситься к аноду и окисляться до пергидроксильного радикала  $\text{HO}_2^\bullet$ . Кроме того,  $\text{OH}^-$ , окисляясь на аноде, будет давать гидроксильные радикалы  $\text{HO}^\bullet$ . Поэтому в электролизере без мембраны в щелочном электролите с участием платинового анода наблюдается более эффективное окисление резорцина.

На рис. 2 представлены кинетические кривые окисления резорцина с применением анодов из Pt и PbO/PbO<sub>2</sub> в кислом электролите в присутствии ионов Fe(II). Из рисунка видно, что за первый час электролиза при плотности тока  $50 \text{ мАсм}^{-2}$  эффективность окисления составила для анода из Pt – 44 %, Pb/PbO<sub>2</sub> – 57 %, Pb/PbO<sub>2</sub> + Fe<sup>2+</sup> – 64 %. Анализ кинетических кривых окисления резорцина при различных значениях pH показал достаточно хорошие линейные зависимости с коэффициентом корреляции  $\sim 0,95$  для реакции псевдопервого порядка, описываемой уравнением:

$$\ln C_0/C = kt, \quad (7)$$

где:  $C_0$  – исходное значение концентрации резорцина,  $\text{мг л}^{-1}$ ;  $C$  – концентрация резорцина через время  $t$ ,  $\text{мг л}^{-1}$ ;  $k$  – кажущаяся константа скорости окисления,  $\text{ч}^{-1}$ .

Найденные значения кажущихся констант скорости при различных плотностях тока и pH приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что более оптимальные условия реализуются при  $\text{pH} = 10$  и плотности тока  $100 \text{ мАсм}^{-2}$ .

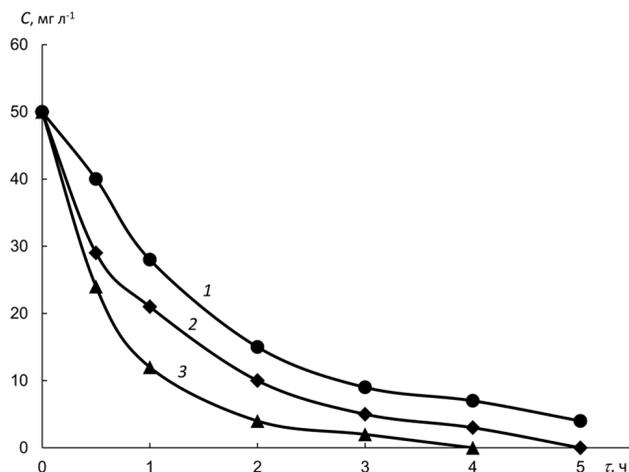


Рис. 2. Кинетические кривые окисления резорцина на анодных материалах из Pt, PbO/PbO<sub>2</sub> при плотности тока 50 мАсм<sup>-2</sup>, pH =2: 1 – анод Pt; 2 – анод Pb/PbO<sub>2</sub>; 3 – анод PbO/PbO<sub>2</sub> с добавлением в раствор Fe<sup>2+</sup>. Исходная концентрация резорцина 50 мг л<sup>-1</sup>

Fig. 2. Kinetic curves of resorcinol oxidation on anodes Pt, PbO/PbO<sub>2</sub> at current density 50 mAcm<sup>-2</sup>, pH =2: 1 – anode Pt; 2 – anode Pb/PbO<sub>2</sub>; 3 – anode PbO/PbO<sub>2</sub> with addition to the solution Fe<sup>2+</sup>. Initial resorcinol concentration 50 mg l<sup>-1</sup>

Таблица 1. Константы скорости окисления резорцина при разных значениях плотности тока и pH электролита. Исходная концентрация резорцина 50 мг л<sup>-1</sup>, анод Pt

Table 1. Resorcinol oxidation rate constants at different current densities and pH electrolyte. Initial resorcinol concentration 50 mg l<sup>-1</sup>, anode – Pt

$i$ , мАсм <sup>-2</sup>	$k$ , ч <sup>-1</sup>		
	pH=2	pH=7	pH=10
25	0,23	0,19	0,29
50	0,65	0,60	0,81
100	1,00	0,90	1,60

В табл. 2 приведены результаты эффективности окисления резорцина в зависимости от плотности тока, времени электролиза, концентрации субстрата и pH электролита с использованием различных анодов.

Из результатов табл. 2 видно, что эффективность окисления резорцина увеличивается при всех значениях pH с увеличением плотности тока. Эффективность окисления за первый час электролиза зависит от природы материала анода, плотности тока, концентрации субстрата и pH раствора электролита. Применение различных анодных материалов показало, что более эффективным анодом при pH = 2 является Pb/PbO<sub>2</sub>, а при pH =10 – Pt.

Методом хромато-масс-спектрологии реакционной смеси в течение 5 ч электролиза были идентифицированы следующие продукты – интермедиаты для обеих схем окисления: I-резорцин, IIа-1,2,4-тригидроксибензол, IIб-пирогаллол, IIIа-2-гидроксигекса-2,4-диен-1,6-дикарбоновая кислота, IIIб-3-гидроксигекса-2,4-диен-1,6-дикарбоновая кислота, IV- шавелевая

Таблица 2. Результаты эффективности окисления резорцина в зависимости от плотности тока, времени электролиза, концентрации субстрата и pH электролита с использованием различных анодов

Table 2. Results of resorcinol oxidation efficiency versus current density, electrolysis duration, substrate concentration and pH electrolyte using different anodes

Условия эксперимента			Эффективность окисления, %	
pH	анод	Плотность тока $i$ , $\text{мАсм}^{-2}$	1 ч	5 ч
$C_p = 50 \text{ мг л}^{-1}$				
10	Pt	25	16	94
		50	48	91
		100	58	99
7	Pt	25	12	92
		50	27	95
		100	32	96
2	Pt	25	8	91
		50	20	96
$C_p = 100 \text{ мг л}^{-1}$				
10	Pt	50	39	96
		100	69	99
2	Pt	50	34	93
		100	37	98
2	Pb/PbO <sub>2</sub>	50	42	90
		100	22	98
2	Pb/PbO <sub>2</sub> + Реактив Фентона	50	51	99
		100	68	95

кислота. Интермедиаты с индексом а идентифицированы в ячейке с анодом из диоксида свинца, с индексом б – в ячейке с платиновым анодом.

На основании полученных результатов анализа можно предположить, что окисление резорцина в обеих системах протекает последовательно через ряд интермедиатов и конечным продуктом является щавелевая кислота. Исходя из этого, можно предположить наиболее вероятную схему его окисления:

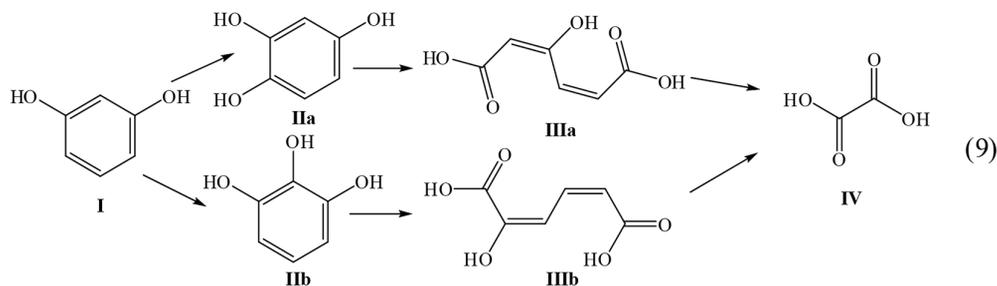


Схема окисления резорцина: I-резорцин, IIа-1,2,4-тригидроксибензол, IIб-пирогаллол, IIIа-2-гидроксигекса-2,4-диен-1,6-дикарбоновая кислота, IIIб-3-гидроксигекса-2,4-диен-1,6-дикарбоновая кислота, IV- щавелевая кислота.

Таким образом, в исследованных условиях из резорцина можно получать по маршрутам I–IV-щавелевую кислоту (IV), которая находит широкое применение в различных отраслях промышленности.

### Заключение

Установлена высокая эффективность непрямого электрокаталитического окисления резорцина активными формами кислорода (АФК), генерированными *in situ* из кислорода в газодиффузионном электроде (ГДЭ) на основе мезоструктурированного углерода СМК-3 и анодах из Pt и Pb/PbO<sub>2</sub> при различных pH в ячейке с неразделенными анодным и катодным пространствами. Выявлено влияние материала анода, плотности тока, pH электролита на эффективность и кинетику процесса. Установлено, что как в щелочном, так и в кислом электролитах с увеличением плотности тока эффективность окисления резорцина возрастает на всех исследованных анодных материалах. В ячейке с Pt анодом в щелочном электролите за первый час электролиза эффективность окисления составила 60 % при плотности тока 50 мАсм<sup>-2</sup> и 94 % – при 100 мАсм<sup>-2</sup>, в кислом электролите за первый час электролиза эффективность составила 59 % при плотности тока 50 мАсм<sup>-2</sup> и 60 % – при 100 мАсм<sup>-2</sup>.

Установлено, что при окислении резорцина при pH=2 с анодами из Pb/PbO<sub>2</sub> и Pt наиболее эффективно реализуется схема Pb/PbO<sub>2</sub> + добавление солей железа (электро – Фентон): при плотности тока 50 мАсм<sup>-2</sup> эффективность составила 99 %. При использовании Pt анода лучшие результаты получены при pH=10 – эффективность окисления при плотности тока 100 мАсм<sup>-2</sup> составила 99 %.

Из резорцина в исследованных условиях непрямого электрокаталитического окисления можно получать щавелевую кислоту, которая находит широкое применение в различных отраслях промышленности.

### Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект 0287–2021–0012) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

This work was conducted within the framework of the budget project 0287–2021–0012 for Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS using the equipment of Krasnoyarsk Regional Research Equipment Centre of SB RAS.

### Список литературы / References

1. Lopes da Silva A. R., Jhones dos Santos A., Martinez-Huitle C. A. Electrochemical measurements and theoretical studies for understanding the behavior of catechol, resorcinol and hydroquinone on the boron doped diamond surface. *RSC Advances* 2018. Vol. 8, P. 3483–3492.
2. Kornienko G.V., Kenova T. A., Kornienko V. L., Golubtsova O. A., Maksimov N. G. Electrochemical oxidation of dyes on oxide lead anode with the involvement of active oxygen species. *Russian Journal of Applied Chemistry* 2017. Vol. 90, P. 1234–1238.

3. Dos Santos A. B., Cervantes F. J., and Van Lier J. B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology, *Bioresource Technology* 2007. Vol. 98, P. 2369–2385.
4. Sirés I., Brillas E., Oturan M. A., Rodrigo M. A., Panizza M. Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review, *Environmental Science Pollution Research* 2014. Vol. 21, P. 8336–8367.
5. Brillas E., Martínez-Huitle C. A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental* 2015. Vol. 166–167, P. 603–643.
6. Kharlamova T. A., Aliev Z. M. Use of electrolysis under pressure for destructive oxidation of phenol and azo dyes. *Russian Journal Electrochemistry* 2016. Vol. 52, P. 251–259.
7. Anglada Á., Urtiaga A., Ortiz I., Mantzavinos D., Diamadopoulos E. Boron-doped diamond anodic treatment of landfill leachate: evaluation of operating variables and formation of oxidation by-products. *Water Research* 2011. Vol. 45, P. 828–838.
8. Pacheco M. J., Santos V., Ciriaco L., Lopes A. Electrochemical degradation of aromatic amines on BDD electrodes, *Journal Hazardous Materials* 2011. Vol. 186, P. 1033–1041.
9. Chaplin B. P., Critical review of electrochemical advanced oxidation processes for water treatment applications, *Environmental Science: Processes Impacts* 2014. Vol. 16, P. 1182–1203.
10. Basha C. A., Sendhil J. S., Kumar K., Muniswaran P. K. A., Lee C. W. Electrochemical degradation of textile dyeing industry effluent in batch and flow reactor systems. *Desalination* 2012. Vol. 285, P. 188–197.
11. Rodrigues A. S., Nunes M. J., Lopes A., Silva J. N., Ciriaco L., Pacheco M. J. Electrodegradation of naphthalenic amines: Influence of the relative position of the substituent groups, anode material and electrolyte on the degradation products and kinetics. *Chemosphere* 2018. Vol. 205, P. 433–442.
12. Sun Y. and Li K. Electrocatalytic Upgrading of Biomass-Derived Intermediate Compounds to Value-Added Products. *Chemistry European Journal Minireview* 2018. Vol. 24, P. 18258–18270.
13. Movil-Cabrera O., Rodriguez-Silva A., Arroyo-Torres C., Staser J. A. Electrochemical conversion of lignin to useful chemicals. *Biomass and Bioenergy* 2016. Vol. 88, P. 89–96.
14. Moreira F. C., Boaventura R. A. R., Brillas E., Vilar V. J. P. Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters. *Applied Catalysis B: Environmental* 2017. Vol. 202, P. 217–261.
15. Nidheesh P. V., Zhou M., Oturan M. A. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere* 2018. Vol. 197, P. 210–227.
16. Zhao F., Li X., Graham N. Treatment of a model HA compound (resorcinol) by potassium manganate. *Separation and Purification Technology* 2012. Vol. 91, P. 52–58.
17. Cimetiere N., Dossier-Berne F., De Laat J. Monochloramination of Resorcinol: Mechanism and Kinetic Modeling. *Environmental Science and Technology* 2009. Vol. 43, P. 9380–9385.
18. Chang Chien S. W., Chen H. L., Wang M. C., Seshiah K. Oxidative degradation and associated mineralization of catechol, hydroquinone and resorcinol catalyzed by birnessite. *Chemosphere* 2009. Vol. 74, P. 1125–1133.
19. Pardeshi S. K., Patil A. B. Solar photocatalytic degradation of resorcinol a model endocrine disrupter in water using zinc oxide. *Journal of Hazardous Materials* 2009. Vol. 163, P. 403–409.

20. Sotelo J.L., Beltran F.J., Gonzalez M. Ozonation of aqueous solutions of resorcinol and phloroglucinol. 1. Stoichiometry and absorption kinetic regime. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 1990. Vol. 29, P. 2358–2367.

21. Kumar S., Zafar M., Prajapati J. K., Kumar S., Kannepalli S. Modeling studies on simultaneous adsorption of phenol and resorcinol onto granular activated carbon from simulated aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials* 2011. Vol. 185, P. 287–294.

22. Nasr B., Abdellatif G., Canizares P., Saez C., Lobato J., Rodrigo M. A. Electrochemical Oxidation of Hydroquinone, Resorcinol, and Catechol on Boron-Doped Diamond Anodes. *Environmental Science and Technology* 2005. Vol. 39, P. 7234–7239.

23. Колягин Г.А., Корниенко В.Л. *Электросинтез пероксида водорода в газодиффузионном электроде. Достижения и перспективы*. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 101 с. [Kolyagin G. A., Kornienko V. L. *Electrosynthesis of hydrogen peroxide in a gas diffusion electrode. Achievements and prospects*. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 101 p. (in Russ.)]

24. Kornienko V.L., Kolyagin G. A., Kornienko G. V., Parfenov V. A., Ponomarenko I. V. Electrosynthesis of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> from O<sub>2</sub> in a Gas-Diffusion Electrode Based on Mesostructured Carbon CMK-3. *Russian Journal of Electrochemistry* 2018. Vol. 54, P. 258–264.

25. Фиошин М.Я., Смирнова М.Г. *Электрохимические системы в синтезе химических продуктов*. М.: Химия, 1985. 256 с. [Fiooshin M. Ya., Smirnova M. G. *Electrochemical systems in the synthesis of chemical products*. Moscow: Chemistry, 1985. 256 p. (in Russ.)]