

Электрохимическая энергетика. 2022. Т. 22, № 3. С. 139–146

*Electrochemical Energetics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 139–146

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2022-22-3-139-146>, EDN: OSZROC

Научная статья

УДК 651.357

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА КИНЕТИКУ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ДИОКСИДА СВИНЦА НА СТАЛЬНУЮ ОСНОВУ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ

В. И. Шпекина<sup>✉</sup>, В. А. Коротков, Н. Д. Соловьева

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.*

*Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77*

**Шпекина Варвара Игоревна**, кандидат технических наук, [vshpekina@mail.ru](mailto:vshpekina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7197-6818>

**Коротков Василий Анатольевич**, аспирант, [korotkovag@rambler.ru](mailto:korotkovag@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2390-9092>

**Соловьева Нина Дмитриевна**, профессор, доктор технических наук, [tepeti@mail.ru](mailto:tepeti@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0421-9347>

**Аннотация.** Исследовалось влияние ультразвукового поля на электроосаждение диоксида свинца из нитратного электролита. Установлено, что под действием ультразвукового поля возрастает адсорбция электроактивных частиц, ускоряется образование ОН-радикалов, соответственно, растёт число зародышей на поверхности электрода. Формируются мелкокристаллические осадки диоксида свинца, что способствует получению высокого выхода по току диоксида свинца, увеличению коэффициента использования активной массы электрода, повышению разрядной ёмкости макета резервного источника тока. Показано, что использование ультразвука при получении диоксидсвинцового электрода позволяет сократить время технологического процесса.

**Ключевые слова:** диоксид свинца, кислый электролит, ультразвук, зародышеобразование, выход по току, разрядная ёмкость, резервный источник тока

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-2919121/1).

**Для цитирования:** Шпекина В. И., Коротков В. А., Соловьева Н. Д. Влияние ультразвука на кинетику электроосаждения диоксида свинца на стальную основу и свойства покрытия // Электрохимическая энергетика. 2022. Т. 22, № 3. С. 139–146. <https://www.doi.org/10.18500/1608-4039-2022-22-3-139-146>, EDN: OSZROC

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## The effect of ultrasound on the coating properties and the kinetics of lead dioxide electrodeposition on the steel base

V. I. Shpekina<sup>✉</sup>, V. A. Korotkov, N. D. Solovyova

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

*77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia*

**Varvara I. Shpekina**, [vshpekina@mail.ru](mailto:vshpekina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7197-6818>

**Vasilij A. Korotkov**, [korotkovag@rambler.ru](mailto:korotkovag@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2390-9092>

**Nina D. Solovyova**, [tepeti@mail.ru](mailto:tepeti@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0421-9347>

**Abstract.** The influence of the ultrasonic field on lead dioxide electrodeposition from nitrate electrolyte was studied. The adsorption of electroactive particles and the amount of nucleation on the electrode surface were found to have increased as well as the formation of OH-radicals accelerated under the influence of the

ultrasonic field. Fine-crystalline deposits of lead dioxide were formed, which contributed to obtaining high current yield of lead dioxide, coefficient increasing of the electrode active mass and increasing of the discharge capacity of the emergency current generator cell layout. It was shown that the application of ultrasound in producing a lead dioxide electrode made it possible to reduce the time of the technological procedure.

**Keywords:** lead dioxide, acidic electrolyte, ultrasound, nucleation, current output, discharge capacity, current generator cell

**Acknowledgements.** This research was financially supported by RFBR according to the research project No. 18-2919121/1.

**For citation:** Shpekina V. I., Korotkov V. A., Solovyova N. D. The effect of ultrasound on the coating properties and the kinetics of lead dioxide electrodeposition on the steel base. *Electrochemical Energetics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 139–146 (in Russian). <https://www.doi.org/10.18500/1608-4039-2022-22-3-139-146>, EDN: OSZROC

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## ВВЕДЕНИЕ

Электролитический диоксид свинца, осажденный на стальную основу, широко применяется в качестве катода в резервных источниках тока (РИТ) [1]. Одним из недостатков этих РИТ является длительность технологических процессов при изготовлении диоксидсвинцовых электродов, а также невысокий коэффициент использования активной массы электрода при разряде. Устранение указанных проблем решается путём подбора состава электролита электроосаждения диоксида, материалов подложки, растворов на стадии подготовки материалов подложки, режимов технологических процессов нанесения покрытия. Перспективным направлением является применение ультразвука (УЗ). В настоящее время влияние ультразвука на электрохимическое поведение различных систем является очень активным направлением исследований. Положительное влияние ультразвука наблюдалось на процессе массопереноса [2], на активации поверхности электрода [3], на процессе адсорбции [4].

Его применение способно не только интенсифицировать процесс электроосаждения диоксида свинца, но и получить мелкокристаллический осадок с высокоразвитой поверхностью и, соответственно, с более высокими разрядными характеристиками.

Целью работы явилось изучение влияния ультразвука на кинетику электрооса-

ждения диоксида свинца на оксидированную сталь и на свойства получаемых электродов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Диоксид свинца наносился на стальную основу (08 КП ГОСТ 503-81) из электролитов состава: водного раствора  $Pb(NO_3)_2$  концентрацией 130 г/л, 350 г/л (защитный слой) и из водного раствора (г/л):  $Pb(NO_3)_2$  – 150,  $HNO_3$  – 30,  $CH_3COOH$  – 60 (слой активного диоксида свинца). Электроосаждение защитного слоя вели при плотности тока ( $i$ ) 50  $mA/cm^2$  (для улучшения адгезии покрытия к материалу основы в конце процесса плотность тока снижалась до 10  $mA/cm^2$ ). Активный слой осаждали при ступенчатом увеличении плотности тока от 5  $mA/cm^2$  до 25  $mA/cm^2$ , также с целью улучшения адгезии. Для снижения потерь ёмкости при эксплуатации источника тока в результате саморазряда, стальная поверхность подвергалась предварительной подготовке перед нанесением диоксида свинца. Варианты предварительной подготовки стали представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, применение ультразвука в операциях подготовки стали способствует уменьшению времени технологического процесса, позволяет снизить температуру раствора электрохимического оксидирования при сохранении предъявляемых требований к качеству рабочей поверх-

Таблица 1 / Table 1

Перечень операций предварительной подготовки стальной поверхности

The list of operations for steel surface pretreatment

<b>Вариант № 1</b>	
Электрохимическое обезжиривание	КОН, 60–80 г/л Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 20–40 г/л Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , 20–40 г/л t = 60°C τ = 5–30 мин; I = 5 А/дм <sup>2</sup>
Декапирование	HCl, 5% τ = 5–10 мин
Электрохимическое оксидирование	КОН, 500–700 г/л t = 60–80°C; τ = 30–40 мин; I = 5 А/дм <sup>2</sup>
Травление	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20–30% τ = 5–10 мин
<b>Вариант № 2</b>	
Обезжиривание в моющем средстве	МС-15 ТУ 2149-013-50685486-2005 15–30 г/л t = 60°C τ = 5–20 мин, при наложении ультразвука
Декапирование	HCl 5% τ = 5–10 мин
Электрохимическое оксидирование	КОН, 500–700 г/л t = 20–60°C τ = 10–20 мин; I = 5 А/дм <sup>2</sup> при наложении ультразвука
Декапирование	HCl, 5% τ = 5–10 мин

ности. Изучение кинетики электроосаждения диоксида свинца на стальную основу проводилось в потенциостатическом режиме при использовании потенциостата марки Р-8 (ООО «Элинс», Россия) с автоматической записью на компьютере при потенциалах: 1570, 1600, 1620, 1650 мВ. Потенциалы рабочего электрода приведены относительно нормального хлоридсеребряного электрода сравнения (н.х.с.э.с.).

Экспериментальные измерения проводились без ультразвука и в ультразвуковом поле на установке УЗУ-0,25 (Ульяновское приборостроительное производственное объединение, СССР).

Катодное поведение электроосаждённых диоксидносвинцовых электродов в 40%-ной хлорной кислоте изучалось

в гальваностатическом режиме при плотности тока 60 мА/см<sup>2</sup>, температуре 22 ± 2°C.

Защитный слой наносился по технологии, используемой в действующем производстве ЗАО «НИИХИТ-2» (Россия). Активный слой наносился при комнатной температуре, как по базовой технологии, так и под действием ультразвука. Было получено несколько партий электродов при использовании ультразвука, различающихся временем осаждения активного слоя, которое составляло 30, 15, 8 мин. Толщина диоксидно-свинцового покрытия измерялась микрометром ГОСТ 6207-90. Бралась средняя величина из 5-6 измерений в разных точках поверхности электрода. В соответствии с требованиями ТУ сцепление покрытия с материалом основы оценивалось по изгибу на 90°. При этом покрытие не должно отслаиваться.

Величину выхода по току  $B_T$  определяли по формуле

$$B_T = \frac{m_\phi}{m_T} \cdot 100\%,$$

где  $m_\phi$  – масса фактически осаждённого материала электрода;  $m_T$  – теоретический возможный привес (в соответствии с законом Фарадея).

Коэффициент использования активной массы рассчитывался по формуле

$$K_{исп} = \frac{C_\phi}{q_T} \cdot 100\%,$$

где  $C_\phi$  – фактическая емкость;  $q_T$  – теоретическая емкость.

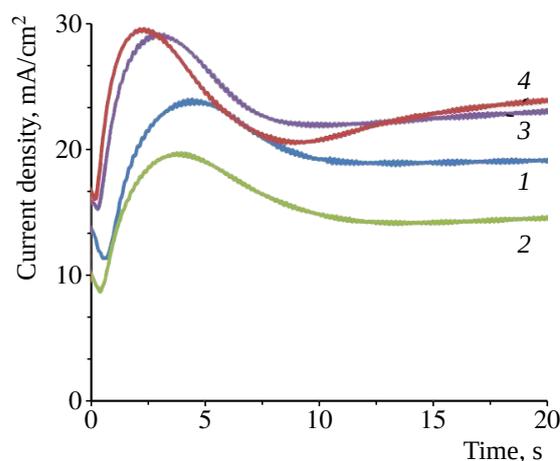
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены потенциостатические  $i$ - $t$  кривые на исследуемых электродах в растворе нитрата свинца концентрации 350 г/л, снятые в отсутствие ультразвука и под действием ультразвука. Кривые характеризуются спадом плотности тока на стадии нестационарной диффузии, затем наблюдается рост плотности тока, обусловленный образованием и ростом зародышей новой фазы ( $PbO_2$ ). Максимум отвечает заполнению поверхности зародышами диоксида свинца

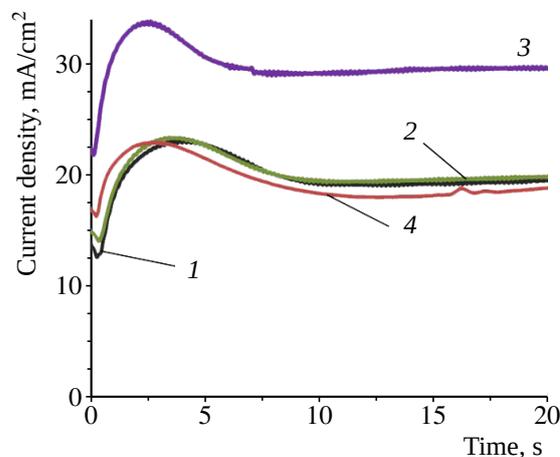
Установлено, что при проведении процесса в ультразвуковом поле, скорость формирования диоксидносвинцового покрытия возрастает. В момент достижения максимума плотности тока  $i_{max}$  на потенциостатических  $i$ - $t$  кривых число зародышей ( $N$ ) для всех режимов роста зародышей (мгновенная нуклеация, кинетический рост; мгновенная нуклеация, диффузионный рост; непрерывная нуклеация, кинетический рост; непрерывная нуклеация, диффузионный рост) определяется уравнением [5]:

$$N = \beta \frac{nF}{i_{max} \cdot \tau_{max} \cdot V_{ат}},$$

где  $n$  – число электронов, участвующих в электродной реакции;  $i_{max}$  – плотность



a/a



б/б

Рис 1. Потенциостатические кривые электроосаждения диоксида свинца на оксидированную сталь в растворе  $Pb(NO_3)_2$  – 350 г/л при потенциалах, мВ: 1 – 1570; 2 – 1600; 3 – 1620; 4 – 1650. Электроосаждение при  $t = 25^\circ C$ : а – без воздействия ультразвукового поля; б – под действием ультразвукового поля

Fig. 1. The potentiostatic curves of lead dioxide electrodeposition on the oxidized steel in  $Pb(NO_3)_2$  – 350 g/l solution at the potentials, mV: 1 – 1570; 2 – 1600; 3 – 1620; 4 – 1650. Electrodeposition at  $t = 25^\circ C$ : а – without the influence of the ultrasonic field; б – under the influence of the ultrasonic field

тока в максимуме  $i$ - $t$  кривой;  $\tau_{max}$  – время в максимуме  $i$ - $t$  кривой;  $V_{ат}$  – атомный объем  $PbO_2$ ;  $\beta$  находится в пределах от 0.067 до 4.07 в зависимости от механизма электроосаждения [5]. Характерный вид исходной потенциостатической  $i$ - $t$  кривой может указывать на механизм мгновенной нуклеации и дальнейшего диффузионного роста, поэто-

му при расчетах числа зародышей ( $N$ ) величина коэффициента  $\beta$  принималась равной 0.067.

В табл. 2 представлены результаты расчетов  $N$ .

**Таблица 2 / Table 2**

Число зародышей диоксида свинца, образующихся на поверхности оксидированной стали к моменту времени  $\tau_{\max}$  в отсутствие ультразвука и при его воздействии при различных потенциалах поляризации в растворе  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 350 \text{ г/л}$

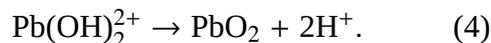
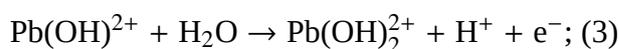
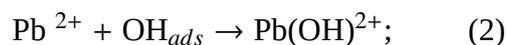
The amount of lead dioxide nucleation formed on the surface of the oxidized steel by the time  $\tau_{\max}$  in the absence and under the influence of the ultrasound at different polarization potentials in the solution of  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 350 \text{ g/l}$

Число зародышей $N \cdot 10^{-8}/\text{cm}^2$	Потенциал поляризации, $E, \text{ мВ}$			
	1570	1600	1620	1650
Без ультразвука	3.5	6.0	4.9	8.8
С ультразвуком	5.0	7.8	7.1	9.9

Из полученных данных следует, что воздействие ультразвука приводит к увеличению числа зародышей, следовательно, способствует формированию мелкокристаллических покрытий.

Характер хода потенциостатических кривых (см. рис. 1) позволил проанализировать начальные участки в координатах  $i-1/\sqrt{\tau}$  (рис. 2).

Отсутствие экстраполяции полученных прямолинейных зависимостей в начало координат позволяет говорить о наличии в суммарном электродном процессе стадии химической реакции. Такой реакцией может быть образование адсорбированной частицы  $\text{OH}_{ads}$ . Согласно современным представлениям о механизме электроосаждения диоксида свинца, развиваемым в работах Джонсона с соавт., Величенко с соавт., и Чанга с соавт. и др. [6–11], предполагается, что первой стадией в процессе электроосаждения является образование адсорбированной частицы  $\text{OH}_{ads}$ , которая становится центром зародышеобразования  $\text{PbO}_2$ :



Опираясь на предлагаемый механизм, рассчитывалась величина адсорбции электроактивных частиц ( $\Gamma_3$ ) в соответствии с уравнением [12]:

$$\Gamma_3 = \frac{i}{F \cdot (\Delta \lg i / \Delta \tau) \cdot n}, \quad (5)$$

где  $i_{\tau=0}$  – начальная плотность тока процесса, определяемая из зависимостей  $i-\sqrt{\tau}$  путем экстраполяции на ось  $i$  при  $\tau = 0$ ;  $F = 96500 \text{ Кл/моль}$  – число Фарадея;  $\Delta \lg i / \Delta \tau$  – наклон кривых  $\lg i-\tau$ ;  $n = 1$  – число электронов, участвующих в реакции. Значения величины адсорбции на оксидированной стали при проведении процесса при ультразвуковом воздействии и без него представлены в табл. 3.

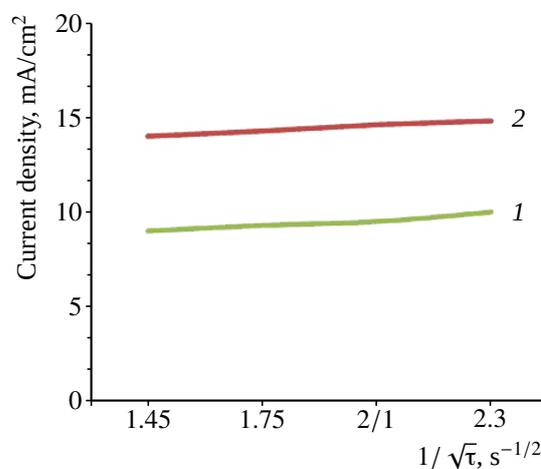


Рис. 2. Зависимость  $i-1/\sqrt{t}$  электроосаждения диоксида свинца на оксидированную стальную подложку при потенциале 1600 мВ без ультразвукового поля (кривая 1) и под действием ультразвукового поля (кривая 2) при  $t = 25^\circ\text{C}$

Fig. 2. The dependence of  $i-1/\sqrt{t}$  of lead dioxide electrodeposition on the electrochemically oxidized steel substrate at the potential of 1600 mV, without ultrasonic field (curve 1) and under its influence (curve 2) at  $t = 25^\circ\text{C}$

Из табл. 3 следует, что однозначной зависимости величины  $\Gamma$  от потенциала по-

ляризации не наблюдается. Но при наложении ультразвукового поля происходит увеличение адсорбции. С введением УЗ-воздействия количество активных центров (адсорбированных ОН-частиц) возрастает за счет генерации дополнительного количества ОН ультразвуком [13]. Таким образом, применение ультразвука при электроосаждении диоксида свинца должно привести к получению осадков мелкозернистой структуры с развитой поверхностью и высокой разрядной емкостью.

**Таблица 3 / Table 3**

Значения величины адсорбции  $\Gamma_3 \cdot 10^6$  (г-экв/см<sup>2</sup>) на оксидированной стали

The values of adsorption  $\Gamma_3 \cdot 10^{-6}$  (g-equiv/cm<sup>2</sup>) on the steel oxidized substrates

Материал подложки	Потенциал, мВ			
	1570	1600	1620	1650
$\Gamma_3 \cdot 10^{-6}$ В отсутствие ультразвука				
Сталь, оксидированная	1.2	0.8	2.0	–
$\Gamma_3 \cdot 10^{-6}$ В ультразвуковом поле				
Сталь, оксидированная	1.4	2	3	–

С целью изучения влияния ультразвука на свойства покрытия варьировалось время электроосаждения диоксида свинца на стальную оксидированную подложку

ку в ультразвуковом поле. В табл. 4 приведены свойства диоксидносвинцового покрытия, электроосажденного на стальную подложку под действием ультразвука. Электрод 4 получен по технологии, используемой в действующем производстве.

Из табл. 4 следует, что применение ультразвука в течение 15 мин (электрод 2) позволяет получить диоксидносвинцовое покрытие, превышающее по толщине электрод 4, что открывает путь для снижения времени технологического процесса. Электроосаждение диоксида свинца в течение 30 мин (электрод 3) приводит к получению более толстых слоев диоксида свинца, чем в отсутствие УЗ, выход по току при этом превышает 100%. Этот факт, согласно литературным данным, можно объяснить включением в состав осадка диоксида свинца молекулярной и связанной воды: при термическом разложении PbO<sub>2</sub> обнаружены эндотермические эффекты, вызванные дегидратацией соединений 3PbO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O и PbO<sub>2</sub> [ОН] [14]. Разрядная емкость макетов РИТ, с полученными в УЗ-поле электродами, оказалась значительно выше (46.8 А·с/см<sup>2</sup>), нежели у РИТ с электродами, полученными по действующей технологии (34 А·с/см<sup>2</sup>).

**Таблица 4 / Table 4**

Свойства PbO<sub>2</sub>, электроосажденного на стальную оксидированную подложку

The properties of PbO<sub>2</sub> electrodeposited on the steel oxidized substrate

№ электрода	Время электроосаждения PbO <sub>2</sub> на стальную оксидированную подложку, мин		Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>		Общее количество электричества на электроосаждение, А·с/см <sup>2</sup>	K <sub>исп</sub> , %	V <sub>т</sub> , %
	подслой	активный слой	подслой	активный слой*			
1	20	8 УЗ	<i>i</i> = 50 (для улучшения адгезии в конце процесса – снижение <i>i</i> до 10 мА/см <sup>2</sup> )	5–10	51.3	60	92
2	20	15 УЗ		5–10	55.5	88	95
3	20	30 УЗ		5–25	73.5	67	111
4	20	30		5–25	73.5	46	99

\*Для улучшения адгезии при электроосаждении активного слоя идет ступенчатое увеличение плотности тока.

\*To improve adhesion during electrodeposition of the active layer, the stepwise increase of the current density takes place.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно заключить, что интенсификация электроосаждения  $PbO_2$  ультразвуком на оксидированную стальную основу объясняется ростом числа зародышей  $PbO_2$  в начальный момент времени в соответствии с представлениями о механизме электроосаждения диоксида свинца через адсорбцию ОН-частиц.

Ультразвук открывает путь для снижения времени процесса осаждения  $PbO_2$  без ущерба для разрядных характеристик элект-

трода. Для электроосаждения  $PbO_2$  под действием ультразвука на стальную оксидированную подложку рекомендуется время 15 мин, что в два раза меньше, чем по технологии, применяемой в действующем производстве.

Диоксидносвинцовые электроды, полученные электроосаждением на стальную оксидированную подложку в ультразвуковом поле в течение 15 мин, имеют высокие коэффициенты использования активной массы ( $K_{исп} = 88\%$ ) и выход по току диоксида свинца ( $B_T = 95\%$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нижниковский Е. А. Современные электрохимические источники тока. М. : Радиотехника. 2015. 294 с.
2. Compton R. G., Eklund J. C., Page S. D., Mason T. J., Walton D. J. Voltammetry in the presence of ultrasound : Mass transport effects // J. Appl. Electrochem. 1996. Vol. 26. P. 775–784. <https://doi.org/10.1007/BF00683739>
3. Compton R. G., Eklund J. C., Page S. D., Sanders G. H. W., Booth J. Voltammetry in the presence of ultrasound. Sonovoltammetry and surface effect // J. Phys. Chem. 1994. Vol. 98. P. 12410–12414.
4. Walton D. J., Phull S. S., Chyla A., Lorimer J. P., Mason T. J., Burke L. D., Murphy M., Compton R. G., Eklund J. C., Page S. D. Sonovoltammetry at platinum electrodes : Surface phenomena and mass transport processes // J. Appl. Electrochem. 1995. Vol. 25. P. 1083–1090. <https://doi.org/10.1007/BF00242534>
5. Гамбург Ю. Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М. : Янус-М, 1997. 384 с.
6. Yeo I. H., Lee Y. S., Johnson D. C. Growth of lead dioxide on a gold electrode in the presence of foreign ions // Electrochim. Acta. 1992. Vol. 37, iss. 10. P. 1811–1815. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(92\)85085-Y](https://doi.org/10.1016/0013-4686(92)85085-Y)
7. González García J., Gallud F., Iniesta J., Montiel V., Aldaz A., Lasia A. Kinetics of electrocrystallisation of  $PbO_2$  on glassy carbon electrodes partial inhibition of the progressive three-dimensional nucleation and growth // J. Electrochem. Soc. 2000. Vol. 147. P. 2969–2974. <https://doi.org/10.1149/1.1393633>
8. Shiwei H., Ruidong X., Sha H., Jiong W., Buming C. Pb(II) effect on electrosynthesis of lead dioxide in alkaline solution // Int. J. Electrochem. Sci. 2016. Vol. 11. P. 5245–5255. <https://doi.org/10.20964/2016.06.88>
9. Velichenko A. B., Baranova E. A., Girenko D. V., Amadelli R., Kovalev S. V., Danilov F. I. Mechanism of electrodeposition of lead dioxide from nitrate solutions // Russ. J. Electrochem. 2003. Vol. 39, № 6. P. 615–621.
10. Hwang B. J., Santhanam R., Chang J. W. Mechanism of electrodeposition of  $PbO_2$  at sheet/rotating disk electrode // Electroanalysis. 2002. Vol. 14, № 5. P. 363–367.
11. Величенко А. Б., Гиренко Д. В., Данилов Ф. И. Механизм электроосаждения диоксида свинца на платиновом электроде // Электрохимия. 1997. Т. 33, № 1. С. 104–107.
12. Новосельский И. М. Хроноамперометрия никелевого электрода в растворах серной кислоты. Определение величин адсорбции // Электрохимия. 1973. Т. 9, № 1. С. 34–44.
13. González-García J., Sáez V., Iniesta I. Electrodeposition of  $PbO_2$  on glassy carbon electrodes : Influence of ultrasound power // Electrochem. Commun. 2002. Vol. 4. P. 370–373.
14. Веселков Е. А. Исследование кинетики термализации гидратированной двуокиси свинца дериватографическим методом // Журнал прикладной химии. 1977. Т. 50, № 9. С. 1955–1957.

## REFERENCES

1. Nizhnikovskij E. A. *Sovremennye jelektrokhimicheskie istochniki toka* [Modern Electrochemical Current Sources]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 294 p. (in Russian).

2. Compton R. G., Eklund J. C., Page S. D., Mason T. J., Walton D. J. Voltammetry in the presence of ultrasound : Mass transport effects. *J. Appl. Electrochem.*, 1996, vol. 26, pp. 775–784. <https://doi.org/10.1007/BF00683739>
3. Compton R. G., Eklund J. C., Page S. D., Sanders G. H. W., Booth J. Voltammetry in the presence of ultrasound. Sonovoltammetry and surface effect. *J. Phys. Chem.*, 1994, vol. 98, pp. 12410–12414.
4. Walton D. J., Phull S. S., Chyla A., Lorimer J. P., Mason T. J., Burke L. D., Murphy M., Compton R. G., Eklund J. C., Page S. D. Sonovoltammetry at platinum electrodes : Surface phenomena and mass transport processes. *J. Appl. Electrochem.*, 1995, vol. 25, pp. 1083–1090. <https://doi.org/10.1007/BF00242534>
5. Gamburg Ju. D. *Jelektrokhimicheskaja kristallizatsija metallov i splavov* [Electrochemical Crystallization of Metals and Alloys]. Moscow, Januks-M Pibl., 1997. 384 p. (in Russian).
6. Yeo I. H., Lee Y. S., Johnson D. C. Growth of lead dioxide on a gold electrode in the presence of foreign ions. *Electrochim. Acta*, 1992, vol. 37, iss. 10, pp. 1811–1815. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(92\)85085-Y](https://doi.org/10.1016/0013-4686(92)85085-Y)
7. GonzálezGarcía J., Gallud F., Iniesta J., Montiel V., Aldaz A., Lasia A. Kinetics of electrocrystallisation of  $PbO_2$  on glassy carbon electrodes partial inhibition of the progressive three-dimensional nucleation and growth. *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147, pp. 2969–2974. <https://doi.org/10.1149/1.1393633>
8. Shiwei H., Ruidong X., Sha H., Jiong W., Buming C. Pb(II) effect on electrosynthesis of lead dioxide in alkaline solution. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2016, vol. 11, pp. 5245–5255. <https://doi.org/10.20964/2016.06.88>
9. Velichenko A. B., Baranova E. A., Girenko D. V., Amadelli R., Kovalev S. V., Danilov F. I. Mechanism of electrodeposition of lead dioxide from nitrate solutions. *Russ. J. Electrochem.*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 615–621.
10. Hwang B. J., Santhanam R., Chang J. W. Mechanism of electrodeposition of  $PbO_2$  at sheet/rotating disk electrode. *Electroanalysis*, 2002, vol. 14, no. 5, pp. 363–367.
11. Velichenko A. B., Girenko D. V., Danilov F. I. The mechanism of electrodeposition of lead dioxide on a platinum electrode. *Jelektrohimija* [Electrochemistry], 1997, vol. 33, no. 1, pp. 104–107 (in Russian).
12. Novosel'skij I. M. hronoamperometry of a nickel electrode in sulfuric acid solutions. Determination of adsorption values. *Jelektrohimija* [Electrochemistry], 1973, vol. 9, no. 1, pp. 34–44 (in Russian).
13. González-García J., Sáez V., Iniesta I. Electrodeposition of  $PbO_2$  on glassy carbon electrodes : Influence of ultrasound power. *Electrochem. Commun.*, 2002, vol. 4, pp. 370–373.
14. Veselkov E. A. The study of the kinetics of thermolysis of hydrated lead dioxide by the derivatographic method. *Prikladnaja khimija* [Applied Chemistry], 1977, vol. 50, no. 9, pp. 1955–1957 (in Russian).

---

Поступила в редакцию 23.05.22; одобрена после рецензирования 01.06.2022; принята к публикации 03.11.2022  
The article was submitted 23.05.22; approved after reviewing 01.06.2022; accepted for publication 03.11.2022