

Электрохимическая энергетика. 2025. Т. 25, № 2. С. 87–94

*Electrochemical Energetics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 87–94

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2025-25-2-87-94>, EDN: THXQSO

Научная статья

УДК 544.653.3

## ГАЛЬВАНО-, ПОТЕНЦИОСТАТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ОКСИДА ГРАФЕНА В ЩЕЛОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

С. В. Брудник<sup>✉</sup>, А. В. Яковлев, Е. В. Яковлева, А. А. Алфёров

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

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

**Брудник Сергей Витальевич**, инженер-исследователь Физико-технического института, [sergraboch@gmail.com](mailto:sergraboch@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7093-6494>

**Яковлев Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химии и химической технологии материалов, [aw\\_71@mail.ru](mailto:aw_71@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3542-1927>

**Яковлева Елена Владимировна**, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры экологии и техносферной безопасности, [elenayakovleva1977@list.ru](mailto:elenayakovleva1977@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8489-9804>

**Алфёров Андрей Алексеевич**, студент Физико-технического института, [andrey\\_080202@mail.ru](mailto:andrey_080202@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2610-9365>

**Аннотация.** Приведены результаты исследования электрохимического восстановления многослойного оксида графена при гальваностатическом и потенциостатическом режиме, показана возможность использования щелочного электролита КОН с концентрацией 0.01 М. Идентификация электрохимически восстановленного оксида графена проводилась методами рентгенофазового анализа, ИК-Фурье и ИК-КР спектроскопией. На основе анализа ИК-КР спектров установлено увеличение общей дефектности, снижение концентрации кислородсодержащих групп и уменьшение размера кристаллита оксида графена.

**Ключевые слова:** оксид графена, многослойный оксид графена, электрохимический синтез, электрохимическое восстановление, щелочной электролит

**Для цитирования:** Брудник С. В., Яковлев А. В., Яковлева Е. В., Алфёров А. А. Гальвано-, потенциостатическое восстановление многослойного оксида графена в щелочном электролите // Электрохимическая энергетика. 2025. Т. 25, № 2. С. 87–94. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2025-25-2-87-94>, EDN: THXQSO

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

Article

## Galvanostatic and potentiostatic reduction of multilayer graphene oxide in alkaline electrolyte

S. V. Brudnik<sup>✉</sup>, A. V. Yakovlev, E. V. Yakovleva, A. A. Alferov

*Yuri Gagarin Saratov State Technical University*

*77 Polytekhnicheskaya St., 410054 Saratov, Russia*

**Sergei V. Brudnik**, [sergrabudnik@gmail.com](mailto:sergrabudnik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7093-6494>

**Andrei V. Yakovlev**, [aw\\_71@mail.ru](mailto:aw_71@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3542-1927>

**Elena V. Yakovleva**, [elenayakovleva1977@list.ru](mailto:elenayakovleva1977@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8489-9804>

**Andrei A. Alferov**, [andrey\\_080202@mail.ru](mailto:andrey_080202@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2610-9365>

**Abstract.** The results of the study of electrochemical reduction of multilayer graphene oxide in galvanostatic and potentiostatic modes are presented, the possibility of using the alkaline electrolyte KOH with the concentration of 0.01 M is shown. The identification of electrochemically reduced graphene oxide was carried out by XRD analysis, IR and Raman spectroscopy. Based on the analysis of Raman spectra, the increase in the total defectiveness, the decrease in the concentration of oxygen-containing groups and the decrease in the crystallite size of graphene oxide were determined.

**Keywords:** graphene oxide, multilayer graphene oxide, electrochemical synthesis, electrochemical reduction, alkaline electrolyte

**For citation:** Brudnik S. V., Yakovlev A. V., Yakovleva E. V., Alferov A. A. Galvanostatic and potentiostatic reduction of multilayer graphene oxide in alkaline electrolyte. *Electrochemical Energetics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 87–94 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2025-25-2-87-94>, EDN: THXQSO

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

## ВВЕДЕНИЕ

Поиск эффективных и экологически чистых методов получения графена остается актуальной задачей современной науки. Оксид графена (ОГ) благодаря своей доступности и простоте модификации является перспективным предшественником графена [1–5]. Несмотря на то, что механизмы электрохимической модификации, особенно механизм восстановления кислородсодержащих групп, до сих пор изучены недостаточно [6], электрохимическое восстановление открывает новые возможности для экологически чистого синтеза восстановленного оксида графена (rGO). Электрохимическое восстановление обычно осуществляется в ячейке с использованием двух- или трёх-электродной схемы, где к ОГ прикладывается отрицательный потенциал, необходимый для восстановления. Восстановленные формы ОГ отличаются от монослойного графена более дефектной структурой, частичным разрушением  $\pi$ -сопряженной системы и сохранением менее 10% кислородсодержащих функциональных групп [7]. В качестве продолжения исследования [8] мы провели восстановление электрохимически полученного многослойного оксида графена (mGO) с использованием стационарных (гальваностатический и потенциостатический) электрохимических методов в электролите КОН с концентрацией 0.01 М.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез многослойного оксида графена ( $Q = 0.7$  А·ч/г) был проведён методом электрохимического (анодного) окисления дисперсного графита (стандарт GB/T 3518-95, Китай) с фракционным составом от 400 до 600 мкм в серной кислоте [9]. Электрохимические измерения проводились на по-

тенциостате Р-150х (ООО «Элинс», Россия) в трехэлектродной ячейке с использованием платиновых катода и токоотвода анода. Электродные потенциалы измерялись относительно хлоридсеребряного электрода сравнения (Ag/AgCl, KCl). Для определения потенциала катодного восстановления проводили регистрацию циклических вольт-амперных (ЦВА) кривых в диапазоне потенциалов от 0.11 до –0.9 В со скоростью развертки потенциала 10 мВ/с. Для получения электрохимически восстановленного rGO использовали дисперсию mGO в растворе КОН (0.01 М) с массовым соотношением 1 : 4. Катодное восстановление протекало в гальваностатическом режиме с током –0.05, –0.075 и –0.1 А с пропусканием количества электричества 0.2–0.4 А·ч/г и потенциостатическом режиме при 0.5, 0.75 и 1 В в течение 1 часа. По окончании электрохимического восстановления смесь фильтровали на воронке Бюхнера, промывали дистиллированной водой до pH = 7–8 и высушивали при температуре 90°C.

Спектры пропускания частиц наноструктурированного mGO регистрировали на ИК-Фурье спектрометре «ФТ-801» («Симекс», Россия). Спектры комбинационного рассеяния (ИК-КР) зарегистрированы на приставке inVia Raman microscope («Renishaw», Великобритания). Оценку размера  $sp^2$ -доменов (кристаллитов) многослойного оксида графена и его производных производили с помощью формулы Туинстра и Кёнига [10], которая имеет следующий вид:

$$L_a = (2.4 \times 10^{-4}) \lambda_L^4 \left( \frac{I_D}{I_G} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $L_a$  – средний размер домена (кристаллита);  $\lambda_L$  – длина волны (514 нм) возбуждающего лазера.

Анализ мод mGO и rGO ( $2000\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ ) проводился по разложению на пять пиков, функциями Лоренца первого порядка, с применением программного пакета Origin 2018 [11]. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследования процесса электрохимического восстановления mGO были зарегистрированы ЦВА-кривых (рис. 1). При смещении потенциала в катодную область от стационарного потенциала ( $E = +0.05\text{ В}$ ), наблюдается увеличение катодного тока при потенциале  $-0.2\text{ В}$ .

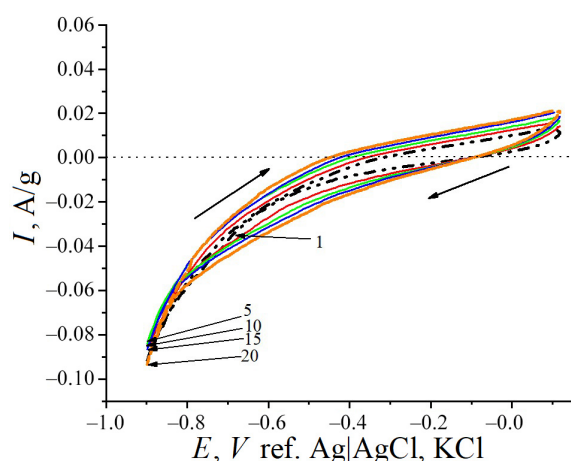


Рис. 1. Кривые ЦВА электрохимического восстановления многослойного оксида графена в растворе KOH (0.01 M). Номерами отмечены соответствующие циклы (цвет онлайн)

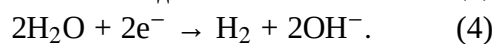
Fig. 1. CV curves of electrochemical reduction of multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) solution. The numbers indicate the corresponding cycles (color online)

Данный ход кривой обусловлен процессом адсорбции атомов водорода на базальной поверхности mGO:



Дальнейшее смещение потенциала в катодную область сопровождается значительным увеличением токов и интенсивным выделением водорода, что регистрируется

на ЦВА-кривых осцилляционным скачкообразным ходом, при котором протекают соответствующие реакции выделения молекулярного водорода:



Ход ЦВА-кривых при восстановлении mGO в растворе KOH характеризуется смещением потенциала в катодную область от стационарного потенциала ( $E = 0.05\text{ В}$ ), по мере циклирования наблюдается увеличение катодного тока и гистерезиса. Процесс электрохимического восстановления оксида графена (ВОГ), полученного по методу Хаммерса–Оффемана, в щелочных электролитах затруднен, поскольку происходит вблизи потенциалов выделения водорода ( $-0.8\text{ В}$  относительно стандартного водородного электрода) [12]. Активный водород, образующийся на катоде (реакции (2)–(4)), вероятно, является восстановителем для mGO в водных растворах электролитов. В результате анализа хода ЦВА-кривых были выбраны гальваностатические и потенциостатические режимы электрохимического восстановления, сопровождающиеся выделением молекулярного водорода и адсорбцией ионов водорода на поверхности, режимы представлены в табл. 1. Электрохимическое восстановление проводилось в течение 1 ч, этот параметр не был оптимизирован и выбран

Таблица 1 / Table 1

Режимы стационарного электрохимического восстановления многослойного оксида графена в растворе KOH (0.01 M)

The modes of the stationary electrochemical reduction of multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) solution

Sample No.	Stationary electrochemical recovery mode	Current, A (Potential, V)
rGO-1	Galvanostatic	$-0.05\text{ А}$
rGO-2		$-0.075\text{ А}$
rGO-3		$-0.1\text{ А}$
rGO-4	Potentiostatic	$-0.5\text{ В}$
rGO-5		$-0.75\text{ В}$
rGO-6		$-1\text{ В}$

условно для определения принципиальной возможности восстановления mGO электрохимическим методом с использованием стационарных режимов.

Ход гальваностатических кривых (рис. 2, а) характеризуется снижением потенциала, процесс протекает относительно стабильно для исследованных значений тока гальваностатического режима восстано-

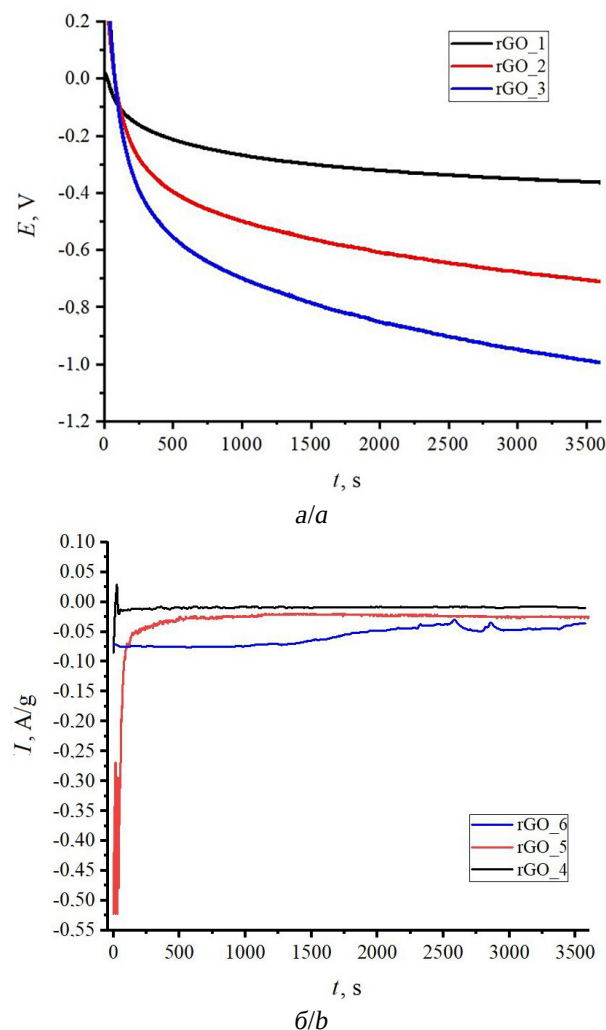


Рис. 2. Кривые гальваностатического ( $I = -0.05$ ,  $-0.075$  и  $-0.1$  А) (а) и потенциостатического ( $E = -0.5$ ,  $-0.75$  и  $-1$  В) (б) восстановления многослойного оксида графена в растворе КОН (0.01 М). Измерения относительно хлоридсеребряного электрода сравнения (Ag/AgCl, KCl) (цвет онлайн)

Fig. 2. Curves of galvanostatic ( $I = -0.05$ ,  $-0.075$  and  $-0.1$  А) (а) and potentiostatic ( $E = -0.5$ ,  $-0.75$  and  $-1$  V) (б) reduction of multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) solution. The measurements are given relative to the silver chloride reference electrode (Ag/AgCl, KCl) (color online)

вления mGO. Стоит отметить ход потенциостатических кривых (рис. 2, б), самый большой катодный ток отмечается при потенциале  $-1$  В, достигает примерно  $-0.6$  А и со временем убывает.

На дифрактограммах образцов электрохимически восстановленного многослойного оксида графена (рис. 3) регистрируются рефлексы базального графита при  $26.0^\circ$  и  $44.6^\circ$ ; пик окисленной фазы ( $11.2^\circ$ ), характерный для mGO отсутствует. Стоит отметить, что полуширина рефлекса ( $\sim 26.0^\circ$ ) больше, что может свидетельствовать об увеличении расслоения фазы базального графита; также наблюдается увеличение интенсивности данной фазы при применении потенциостатического режима восстановления mGO.

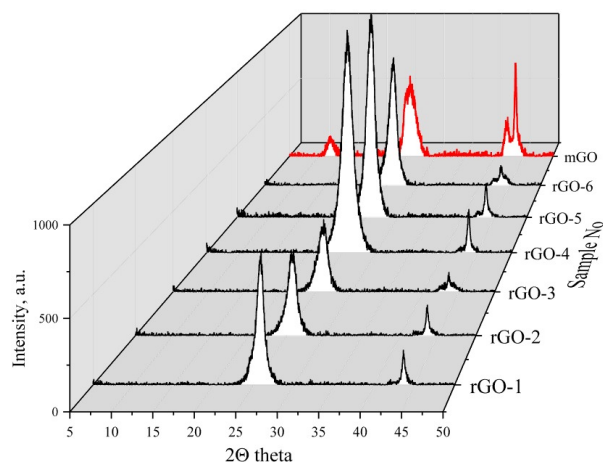


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы электрохимически восстановленного многослойного оксида графена в растворе КОН (0.01 М) (цвет онлайн)

Fig. 3. X-ray diffractograms of electrochemically reduced multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) solution (color online)

На ИК-спектрах восстановленных форм mGO (рис. 4) наблюдаются снижения интенсивностей характеристичных кислородсодержащих групп относительно ИК-спектра mGO, в особенности свободных гидроксильных групп, пик при  $\sim 1700$   $\text{cm}^{-1}$ , характерный для валентных связей карбонильных групп. Полоса, соответствующая колебаниям связей C=C ( $\sim 1600$   $\text{cm}^{-1}$ ), имеет меньшую интенсивность и смещена до  $1590$   $\text{cm}^{-1}$ . Метод ИК-спектроскопии подтверждает снижение интенсивности полосы, соответствующую

щей колебаниям эпоксидных связей на спектрах восстановленных форм.

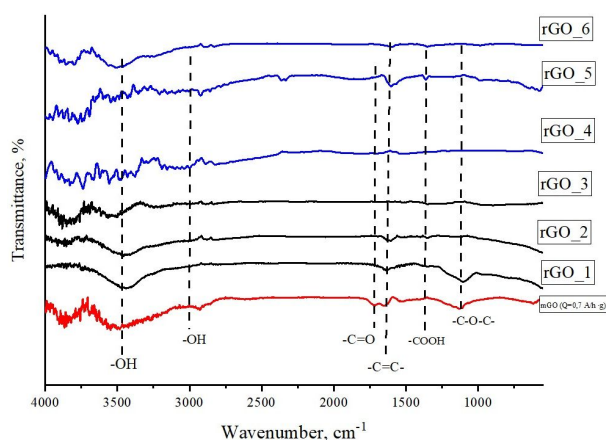


Рис. 4. ИК-спектры восстановленных форм многослойного оксида графена в растворе электролита KOH (0.01 M)

Fig. 4. IR spectra of the reduced forms of multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) electrolyte solution

Стоит отметить, что провести количественную оценку снижения разных кислородсодержащих групп затруднительно вследствие влияния внешних условий на строение mGO [13].

По результатам КР-спектроскопии rGO при использованных стационарных режимах восстановления (рис. 5) спектры характеризуются наличием интенсивных полос *D* и *G* и характерных для многослойных структур обертонов (*2D* и *D+G*).

Вследствие разложения полос КР-спектров rGO, с помощью функций Лоренца были идентифицированы такие полосы обертонов *D*-моды: *D\** – обусловлена присутствием связей  $sp^2$ - $sp^3$  по краям и базальной плоскости; *D'* – связана с увеличением дефектов графеновой плоскости или присутствием органических молекул и/или новых функциональных групп; *D'* – наличие данной полосы характеризует наличие дефектов в виде полиареновых остовов или хаотично распределённых зарядов поверхностей [14].

В ходе анализа КР-спектров были рассчитаны отношение интенсивностей *D/G* пиков, отношение обертона *D\*/G*, который характеризует параметр степени восстановлен-

ности и средний размер домена ( $L_a$ ). Результаты расчётов приведены в табл. 2.

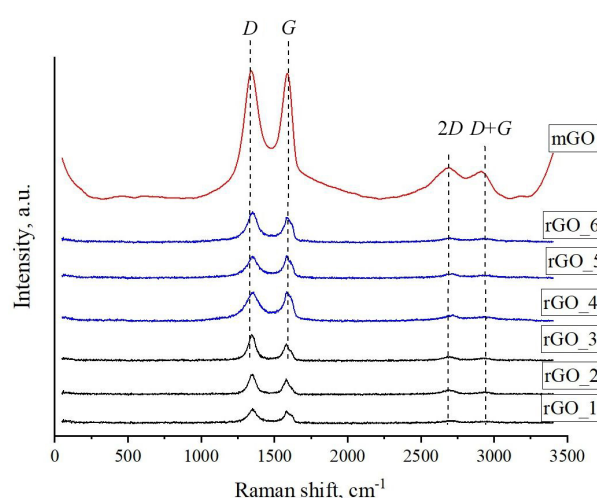


Рис. 5. КР-спектры восстановленных форм многослойного оксида графена в растворе KOH (0.01 M)

Fig. 5. Raman spectra of the reduced forms of multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) solution

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализа КР-спектров восстановленных форм многослойного оксида графена в растворах KOH (0.01 M)

The results of the analysis of Raman spectra of the reduced forms of multilayer graphene oxide in KOH (0.01 M) solutions

Sample no.	$L_a$ , нм	$I_D/I_G$	$I_{D^*}/I_G$
rGO-1	17.01	0.985	0.096
rGO-2	16.36	1.024	0.092
rGO-3	13.53	1.238	0.078
rGO-4	15.36	1.091	0.089
rGO-5	12.79	1.312	0.064
rGO-6	10.52	1.593	0.051
mGO ( $Q = 0.7$ A·h/g)	17.62	0.951	0.118

Интенсивность *D*-полосы и её обертонов (*D\**, *D'*, *D''*) зависит от количества дефектов и атомов кислорода, присутствующих на поверхности mGO. Исходя из результатов полученных величин восстановленных форм mGO, размеры графеновых кристаллитов уменьшаются в ходе увеличения общей степени дефектности  $sp^2$ -гибридизованных графеновых плоскостей (рис. 6, а).

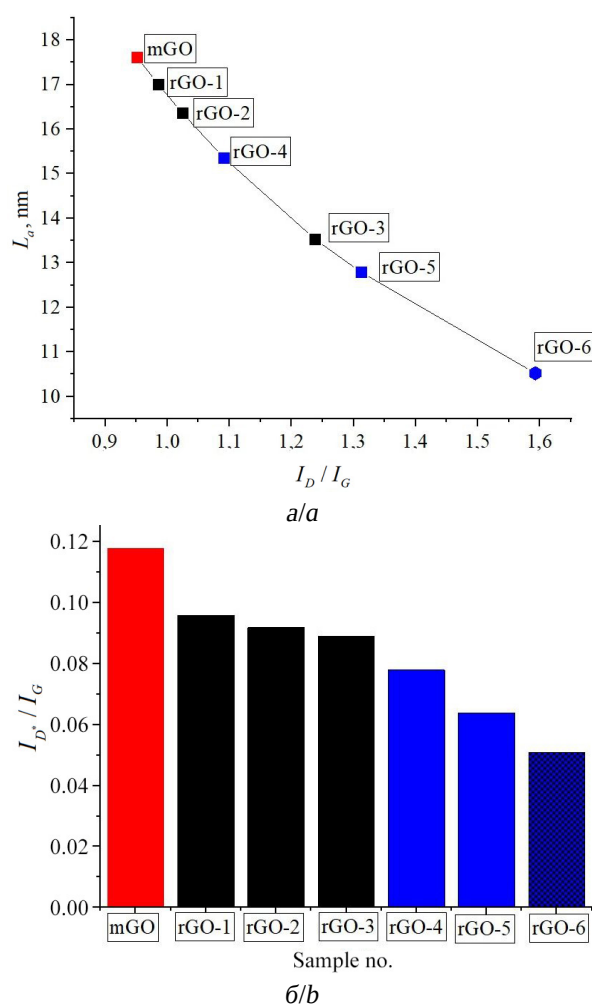


Рис. 6. Кривая зависимости среднего размера кристаллита ( $L_a$ ) от  $I_D/I_G$  (a); распределение общей степени восстановленности ( $I_{D^*}/I_G$ ) (б)

Fig. 6. The dependence curve of of the average crystallite size ( $L_a$ ) on  $I_D/I_G$  (a); the distribution of the total degree of reduction ( $I_{D^*}/I_G$ ) (b)

Электрохимическое восстановление mGO способствует уменьшению некой доли кислородсодержащих групп, что подтвер-

ждается по вторичным признакам, вследствие уменьшения рассчитанного отношения интенсивностей полос  $D^*/G$  (рис. 6, б), наименьшее значение данного параметра имеет образец rGO-6.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получен восстановленный многослойный оксид графена методом электрохимического катодного восстановления в щелочном электролите на основе КОН (0.01 М) при гальваностатическом и потенциостатическом режимах. В отличие от описанных в литературе методов электрохимического восстановления оксида графена, предполагающих применение пленочного электрода из ОГ нанесенного на подложку, в данной работе использовалась дисперсия ОГ в щелочном электролите, поэтому сопоставление полученных результатов не корректно.

Установлено, что наибольшая эффективность электрохимического восстановления достигается в потенциостатическом режиме при потенциале  $-1$  В в течение 1 часа. Формирование восстановленного оксида графена подтверждено методом ИК-спектроскопии по снижению интенсивности пиков кислородсодержащих поверхностных групп. Методом КР-спектроскопии показано изменение общей дефектности по соотношению интенсивностей  $D$ ,  $D^*$  и  $G$  пиков, наибольшую дефектность ( $I_D/I_G = 1.58$ ) и меньший средний размер кристаллита ( $L_a = 10.54$  нм) имеет образец восстановленного оксида графена, полученный при потенциале  $-1$  В.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panahi-Sarmad M., Chehraz E., Noroozi M., Raef M., Razzaghi-Kashani M., Baian M. A. H. Tuning the Surface Chemistry of Graphene Oxide for Enhanced Dielectric and Actuated Performance of Silicone Rubber Composites // CS Appl. Electron. Mater. 2019. Vol. 1, № 2. P. 198–209. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00042>
2. Yu W., Sisi L., Haiyan Y., Jie L. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide:

A review // RSC Adv. 2020. Vol. 10. P. 15328–15345. <https://doi.org/10.1039/D0RA01068E>

3. Sun L. Structure and synthesis of graphene oxide // Chin. J. Chem. Eng. 2019. Vol. 27, iss. 10. P. 2251–2260. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.05.003>

4. Paulchamy B., Arthi G., Lignesh B. D. A Simple Approach to Stepwise Synthesis of Graphene Oxide Nanomateria // J. Nanomed. Nanotechnol. 2015.



Vol. 6, № 1. P. 1–4. <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000253>

5. Ambrosi A., Chua C. K., Latiff N. M., Loo A. H., Wong C. H. A., Eng A. Y. S., Pumera M. Graphene and its electrochemistry – an update // *Chemical Society Reviews*. 2019. Vol. 45, № 9. P. 2458–2493. <https://doi.org/10.1039/C6CS00136J>

6. Renteria J. A. Q., Ruiz-Garcia C., Sauvage T., Chazaro-Ruiz L. F., Rangel-Mendez J. R., Ania C. O. Photochemical and electrochemical reduction of graphene oxide thin films: Tuning the nature of surface defects // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. Vol. 22, № 36. P. 20732–20743. <https://doi.org/10.1039/D0CP02053B>

7. Tarcan R., Todor-Boer O., Petrovai I., Leordean C., Astilean S., Botiz I. Reduced graphene oxide today // *J. Mater. Chem. C*. 2020. Vol. 8. P. 1198–1224. <https://doi.org/10.1039/C9TC04916A>

8. Брудник С. В., Яковлев А. В., Яковлева Е. В., Алфёров А. А., Целуйкин В. Н., Мостовой А. С. Электрохимическое восстановление многослойного оксида графена в щелочном электролите // *Электрохимическая энергетика*. 2023. Т. 23, № 1. С. 33–40. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-1-33-40>

9. Yakovlev A. V., Yakovleva E. V., Tseluikin V. N., Krasnov V. V., Mostovoy A. S., Rakhmetulina L. A., Frolov I. N. Electrochemical synthesis of multilayer

graphene oxide by anodic oxidation of disperse graphite // *Russ. J. Electrochem.* 2019. Vol. 55, № 12. P. 1196–1202. <https://doi.org/10.1134/S102319351912019X>

10. Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite // *The Journal of Chemical Physics*. 1970. Vol. 53, № 3. P. 1126–1130.

11. Claramunt S., Varea A., Lopez-Diaz D. The Importance of Interbands on the Interpretation of the Raman Spectrum of Graphene Oxide // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015. Vol. 119, № 18. P. 10123–10129.

12. Zhang Q., Scraftford K., Li M. Anomalous Capacitive Behaviors of Graphene Oxide Based Solid-State Supercapacitors // *Nano Lett.* 2014. Vol. 14. P. 1938. <https://doi.org/10.1021/nl4047784>

13. Goodwin D. G., Adeleye A. S., Sung L. Detection and quantification of graphene-family nanomaterials in the environment // *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52, № 8. P. 4491–4513. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04938>

14. Radon A., Wlodarczyk P., Lukowiec D. Structure, temperature and frequency depend on electrical conductivity of oxidized and reduced electrochemically exfoliated graphite // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 2018. Vol. 99. P. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2018.01.025>

## REFERENCES

1. Panahi-Sarmad M., Chehrazhi E., Noroozi M., Raef M., Razzaghi-Kashani M., Baian M. A. H. Tuning the Surface Chemistry of Graphene Oxide for Enhanced Dielectric and Actuated Performance of Silicone Rubber Composites. *CS Appl. Electron. Mater.*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 198–209. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00042>

2. Yu W., Sisi L., Haiyan Y., Jie L. Progress in the functional modification of graphene / graphene oxide: A review. *RSC Adv.*, 2020, vol. 10, pp. 15328–15345. <https://doi.org/10.1039/D0RA01068E>

3. Sun L. Structure and synthesis of graphene oxide. *Chin. J. Chem. Eng.*, 2019, vol. 27, iss. 10, pp. 2251–2260. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.05.003>

4. Paulchamy B., Arthi G., Lignesh B. D. A Simple Approach to Stepwise Synthesis of Graphene Oxide Nanomaterials. *J. Nanomed. Nanotechnol.*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 1–4. <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000253>

5. Ambrosi A., Chua C. K., Latiff N. M., Loo A. H., Wong C. H. A., Eng A. Y. S., Pumera M. Graphene and its electrochemistry – an update. *Chemical Society Reviews*, 2019, vol. 45, no. 9, pp. 2458–2493. <https://doi.org/10.1039/C6CS00136J>

6. Renteria J. A. Q., Ruiz-Garcia C., Sauvage T., Chazaro-Ruiz L. F., Rangel-Mendez J. R., Ania C. O. Photochemical and electrochemical reduction of graphene oxide thin films: Tuning the nature of surface de-

fects. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 20732–20743. <https://doi.org/10.1039/D0CP02053B>

7. Tarcan R., Todor-Boer O., Petrovai I., Leordean C., Astilean S., Botiz I. Reduced graphene oxide today. *J. Mater. Chem. C*, 2020, vol. 8, pp. 1198–1224. <https://doi.org/10.1039/C9TC04916A>

8. Brudnik S. V., Yakovlev A. V., Yakovleva E. V., Alferov A. A., Tseluikin V. N., Mostovoy A. S. Electrochemical reduction of multilayer graphene oxide in an alkaline electrolyte. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 33–40. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-1-33-40>

9. Yakovlev A. V., Yakovleva E. V., Tseluikin V. N., Krasnov V. V., Mostovoy A. S., Rakhmetulina L. A., Frolov I. N. Electrochemical synthesis of multilayer graphene oxide by anodic oxidation of disperse graphite. *Russ. J. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 1196–1202. <https://doi.org/10.1134/S102319351912019X>

10. Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite. *The Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 53, no. 3, pp. 1126–1130.

11. Claramunt S., Varea A., Lopez-Diaz D. The Importance of Interbands on the Interpretation of the Raman Spectrum of Graphene Oxide. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, vol. 119, no. 18, pp. 10123–10129.

12. Zhang Q., Scraftford K., Li M. Anomalous Capacitive Behaviors of Graphene Oxide Based Solid-State Supercapacitors. *Nano Lett.*, 2014, vol. 14, pp. 1938. <https://doi.org/10.1021/nl4047784>

13. Goodwin D. G., Adeleye A. S., Sung L. Detection and quantification of graphene-family nanomaterials in the environment. *Environmental Science & Technology*,

2018, vol. 52, no. 8, pp. 4491–4513. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04938>

14. Radon A., Włodarczyk P., Lukowiec D. Structure, temperature and frequency depend en telectrical conductivity of oxidized and reduced electrochemically exfoliated graphite. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2018, vol. 99, pp. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2018.01.025>

Поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 26.05.2025; принята к публикации 09.06.2025; опубликована 30.06.2025  
The article was submitted 12.05.2025; approved after reviewing 26.05.2025; accepted for publication 09.06.2025; published 30.06.2025