

## УГЛЕРОДНАЯ ПАСТА НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА ДЛЯ ТРАФАРЕТНОЙ ПЕЧАТИ ЭЛЕКТРОДОВ

М.И. Грязнова, Д.С. Лугвищук, А.Р. Караева, В.З. Мордкович

Марина Игоревна Грязнова (ORCID 0000-0002-9141-1934)\*, Дмитрий Сергеевич Лугвищук (ORCID 0000-0001-9589-6206), Аида Разимовна Караева (ORCID 0000-0002-9728-354X), Владимир Зальманович Мордкович (ORCID 0000-0002-9553-7657)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: mig@tisnum.ru \*, lugvishchuk.d@tisnum.ru, karaevaar@tisnum.ru, mordkovich@tisnum.ru

*В данной работе описаны разнообразные составы электропроводящих паст на основе поливинилхлорида, подходящих для технологии трафаретной печати. Вышеупомянутая паста представляет собой композитную систему, состоящую из мелкодисперсных частиц проводящего наполнителя, в частности, различных модификаций углерода, которые равномерно диспергированы внутри полимерного связующего. Таким образом, электропроводящие углеродные пасты состоят из трех основных компонентов: проводящего углеродного наполнителя, полимерного связующего и растворителя. Возможно применение в составе пасты иных модифицирующих или стабилизирующих добавок. В работе проведен поиск оптимального соотношения в пастах между полимерным связующим, в качестве которого выбран поливинилхлорид, и суммарным количеством используемых углеродных наполнителей, графитом и газовой сажой. Это позволило получить сравнительно качественные электроды с невысоким удельным электрическим сопротивлением. Для дальнейшего поиска минимально возможного значения удельного электрического сопротивления при выбранной концентрации поливинилхлорида проведена дополнительная серия экспериментов с варьированием соотношений между обоими углеродными наполнителями. Представлены результаты сравнительного анализа поверхности изготовленных электродов методом сканирующей электронной микроскопии, демонстрирующие разницу в качестве покрытия в зависимости от составов. Показано, что в соответствии с требуемыми целями возможно получение электропроводящих углеродных паст с заданными свойствами. Описаны факторы, в результате которых возникают дефекты, влияющие как на процесс трафаретной печати, так и на конечную печатную продукцию. Приведено уникальное графическое представление корреляции итогового значения удельного электрического сопротивления электродов с возможностью проведения трафаретной печати разработанных электропроводящих углеродных паст.*

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, трафаретная печать, углеродная паста, электрод с трафаретной печатью

## POLYVINYL CHLORIDE BASED CARBON PASTE FOR SCREEN PRINTING OF ELECTRODES

M.I. Gryaznova, D.S. Lugvishchuk, A.R. Karaeva, V.Z. Mordkovich

Marina I. Gryaznova (ORCID 0000-0002-9141-1934)\*, Dmitry S. Lugvishchuk (ORCID 0000-0001-9589-6206), Aida R. Karaeva (ORCID 0000-0002-9728-354X), Vladimir Z. Mordkovich (ORCID 0000-0002-9553-7657)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7A, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: mig@tisnum.ru\*, lugvishchuk.d@tisnum.ru, karaevaar@tisnum.ru, mordkovich@tisnum.ru

*This paper describes various compositions of electrically conductive pastes based on polyvinyl chloride, which are suitable for screen printing technology. These pastes are composite systems consisting of finely dispersed particles of a conductive filler, specifically various carbon modifications. These carbon particles are uniformly dispersed within a polymer binder. Electrically conductive carbon pastes therefore consist of three main components: the conductive carbon filler, the polymer binder, and a solvent. Other modifying or stabilizing additives can also be used in the paste, depending on the specific application. The paper investigates the optimal ratio of these components in pastes, specifically between the selected polymer binder (polyvinyl chloride) and the total amount of carbon fillers (graphite and carbon black). This allows to obtain relatively high-quality electrodes with low electrical resistance. To further search of the minimum possible electrical resistivity value at the selected polyvinyl chloride concentration, an additional set of experiments was conducted with varying ratios of both carbon fillers. The results of a comparative analysis of the surface of the manufactured electrodes using scanning electron microscopy are presented, showing the difference in coating quality based on the composition. It is demonstrated that, in order to meet the required objectives, it is possible to produce electrically conductive carbon pastes with specific properties. Factors that lead to defects affecting both the screen printing process and final printed products are discussed. A unique graph illustrating the correlation between the possibility of screen printing the developed electrically conductive carbon paste and the final electrical resistivity values of the electrodes based on them is provided.*

**Key words:** polyvinyl chloride, screen printing, carbon paste, screen printed electrode

**Для цитирования:**

Грязнова М.И., Лугвищук Д.С., Караева А.Р., Мордкович В.З. Углеродная паста на основе поливинилхлорида для трафаретной печати электродов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 10. С. 99–104. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.3y.

**For citation:**

Gryaznova M.I., Lugvishchuk D.S., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z. Polyvinyl chloride based carbon paste for screen printing of electrodes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 10. P. 99–104. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.3y.

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет электропроводящие пасты активно используются в области электроники. Получаемые на их основе методом трафаретной печати миниатюрные и многофункциональные электроды (screen printed electrodes, SPE) обладают низкой себестоимостью и просты в изготовлении [1-3]. SPE нашли широкое применение в качестве компонента различных электрохимических биосенсоров [4-12]. Поэтому в качестве электропроводящего наполнителя для паст используют такие модификации углерода, как технический углерод (сажа), графит, углеродные нанотрубки, графен и оксид графена [13-18]. Данные материалы обладают превосходной проводимостью, химической и электрохимической стабильностью, универсальностью, широкими потенциальными окнами и богатым химическим составом поверхности [19-22].

Также подходящим материалом для изготовления электропроводящей углеродной пасты (ЭУП) является терморасширенный графит (ТРГ).

Например, в работе [23] показано, что применение ТРГ в составе ЭУП позволяет снизить содержание углеродных проводящих частиц до 16 масс. %, сохраняя при этом низкое удельное сопротивление получаемых электродов ( $440 \text{ Ом} \times \text{мм}^2 \times \text{м}^{-1}$ ) и, таким образом, снижая себестоимость ее изготовления. Однако при дальнейших испытаниях полученной ЭУП в процессе циклической печати на полуавтоматическом печатном станке были выявлены недочеты состава пасты. Основным его недостатком являлось широкое распределение частиц терморасширенного и мелкозернистого графитов по размерам, что приводило к пропорционально возрастающей блокировке ячеек трафаретной сетки. В свою очередь, это приводило к образованию нечеткого контура у электродов, расплыванию пасты на подложке и замыканию электродов, напечатанных рядом друг с другом. Следовательно, применение ТРГ в составе ЭУП ограничивает использование некоторых видов трафаретных сеток, в том числе и тех, которые позволяют получать наиболее детализированные отпечатки после печати.

Поэтому основными задачами данной работы были поиск альтернативного основного углеродного наполнителя и поиск оптимальных соотношений между полимерным связующим и проводящими добавками.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния соотношений углеродных наполнителей на свойства электродов, изготовленных из проводящих паст на основе поливинилхлорида.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для приготовления полимерного связующего для ЭУП были использованы: суспензионный поливинилхлорид (ПВХ) марки С-7059 М, тетралин (квалификация «ч.»), N-метилпирролидон (квалификация «ч.») и органофункциональный силан марки LT560. В качестве проводящих добавок были выбраны такие углеродные материалы, как измельченный графит и газовая сажа (ГС) марки N375.

Получение ЭУП включало в себя следующие стадии:

- 1) растворение ПВХ в смеси растворителей;
- 2) введение в раствор стабилизатора (органофункционального силана);
- 3) введение в раствор углеродных наполнителей: графита и ГС;
- 4) гомогенизация смеси в двойной ассиметричной центрифуге КАУО-500S.

Трафаретную печать исследуемых паст проводили на ручном станке WSC-160 В через сетку с выбранным трафаретным рисунком электрода. После печати электроды подвергали термической обработке в сушильном шкафу для их закрепления на подложке из полиэтилентерефталата. Форма готовых электродов была близка к прямоугольной с параметрами: длина – 40 мм, ширина – 1 мм, толщина – 10-15 мкм.

Морфология и дефекты поверхности углеродных электродов были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью электронного микроскопа TESCAN Vega 3.

Измерение электрического сопротивления проводили с помощью четырехзондового метода на приборе Keithley 2400 Standard Series SMU при комнатной температуре (~ 25 °С).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение трафаретной сетки при печати электродов накладывало ограничение на размер частиц твердых компонентов пасты. В данной ра-

боте их размер не должен превышать 20 мкм, поэтому исходный графит подвергался предварительному измельчению до дисперсности в 3-15 мкм.

Для поисков оптимального соотношения между полимером и углеродными наполнителями с целью уменьшения электрического сопротивления изготовлена серия образцов из шести паст, которые отличались между собой только концентрациями ПВХ и растворителей. Концентрации ПВХ, углерода и удельное электрическое сопротивление электродов, напечатанных с помощью ручного станка, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость удельного электрического сопротивления электрода от концентрации ПВХ

Table 1. An electrode electrical resistivity dependence on PVC concentration

№ ЭУП	1	2	3	4	5	6
Массовая доля ПВХ, %	4,5	5,3	5,7	6,1	6,5	7,5
Суммарная массовая доля углерода, %	37,8					
Массовая доля графита, %	32,1					
Массовая доля сажи, %	5,7					
Удельное электрическое сопротивление, Ом×мм <sup>2</sup> ×мм <sup>-1</sup>	2243	2250	1425	2723	3053	3750

Зависимость удельного электрического сопротивления электрода от концентрации ПВХ представлена на рис. 1.

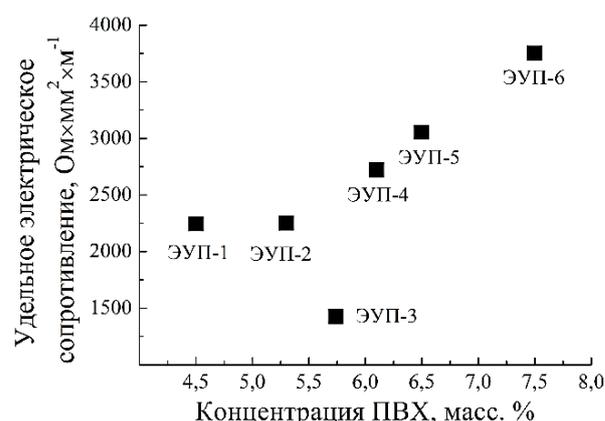


Рис. 1. Зависимость удельного электрического сопротивления электрода от концентрации ПВХ в соответствующей пасте  
Fig. 1. Dependence of the specific electrical resistance of the electrode on the concentration of PVC in the corresponding paste

Результаты проведенных исследований показали, что концентрация ПВХ в 5,7 масс. % являлась оптимальной при общем содержании углерода в 37,7 масс. %, а паста ЭУП-3 имела

наименьшее удельное электрическое сопротивление в  $1425 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ , как показано в табл. 1. Минимального удельного электрического сопротивления возможно достичь в узкой области концентрации ПВХ (рис. 1). Поэтому в дальнейшем состав ЭУП-3 был оптимизирован по содержанию углеродных проводящих компонентов для получения максимально возможной проводимости.

Дополнительно было изготовлено еще несколько образцов ЭУП, в которых варьировалась как количество углерода в пасте, так и соотношения между графитом и ГС. Зависимость удельного электрического сопротивления электродов от концентрации углерода в пастах представлена в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость удельного электрического сопротивления электрода от концентрации углерода в ЭУП  
**Table 2. The dependet of specific electrical resistivity of electrode on EGP carbon component concentration**

№ ЭУП	3	7	8	9	10	11
Массовая доля графита, %	32,1	37,7	32,1	37,7	30,0	32,1
Массовая доля сажи, %	5,7	0	10,0	5,0	7,7	7,0
Суммарная массовая доля углерода, %	37,8	37,7	42,1	42,7	37,7	39,1
Удельное электрическое сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$	1425	6000	2750	3190	923	1063

В ходе исследований установлено, что вклад ГС в электрическое сопротивление углеродных электродов являлся достаточно весомым. Так, при испытаниях ЭУП-7, в которой содержался только графит, удельное электрическое сопротивление составило  $6000 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ . Увеличение количества проводящих углеродных компонентов в пасте до 42,1 масс. % привело к ухудшению качества печати. А повышение электрического сопротивления до 2750 (ЭУП-8) и 3190 (ЭУП-9)  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$  вызвано сокращением концентрации ГС. Таким образом, показано, что для данной композиции пасты оптимальным является содержание проводящих углеродных компонентов, а именно измельченного графита и ГС, в количестве 37,7 масс. %.

В результате экспериментов с составами ЭУП-10 ( $923 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ ) и ЭУП-11 ( $1063 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ ) достигнуто понижение удельного электрического сопротивления электродов в 6,5 раз по сравнению с электродами ЭУП-7 ( $6000 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ ).

Поверхность электродов ЭУП-7 и ЭУП-10 по данным СЭМ также значительно отличается (рис. 2, рис. 3). На электроде ЭУП-7 заметны более

светлые и непроводящие области ПЭТФ-подложки, на которых при съемке накапливался электрический заряд из-за дефектов заполнения объема электрода углеродными частицами. Электрод ЭУП-10 хоть и обладает не сглаженной поверхностью, тем не менее, полностью заполнен графитовыми чешуйками, покрытыми частицами ГС.

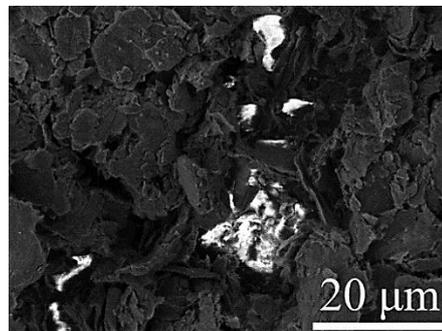


Рис. 2. СЭМ-микрофотография поверхности электрода на основе ЭУП-7

Fig. 2. SEM micrograph of the EGP-7 based electrode surface

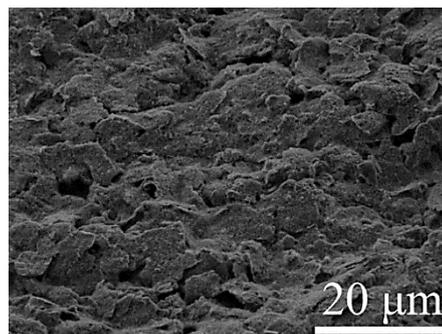


Рис. 3. СЭМ-микрофотография поверхности электрода на основе ЭУП-10

Fig. 3. SEM micrograph of the EGP-10 based electrode surface

Основные причины неудовлетворительных результатов трафаретной печати включают в себя множество факторов, на которые, в первую очередь, значительно влияет состав ЭУП. Поэтому ЭУП должна разрабатываться с учетом особенностей химической устойчивости трафаретной сетки, ракеля, контр-ракеля, а также остальных контактных деталей трафаретного станка. Также ЭУП, не удовлетворяющей требованиям трафаретного станка при циклической печати, считается паста с неравномерным распределением по трафарету и/или высыхающая на нем, все это повышает процент брака изготавливаемой продукции. При этом отпечаток после печати, должен сохранять четкий контур и не растекаться по ПЭТФ-подложке, что должно обеспечиваться вязкостью, адгезией к поверхности подложки и малой толщиной оттиска ЭУП. В процессе термической обработки необходимо обеспечить полное удаление растворителя, сохранение

химической инертности отпечатка при таких условиях, чтобы на ПЭТФ-подложке образовалась однородная электропроводящая пленка.

Исследуемые образцы ЭУП были также рассмотрены с точки зрения возможности проведения трафаретной печати. Итоги представлены на рис. 4 в виде графика зависимости удельного электрического сопротивления электродов из всех 11 ЭУП от массового соотношения углерода к полимеру в пасте. Визуализированная область составов и свойств паст, подходящих для трафаретной печати, обозначена штриховкой.

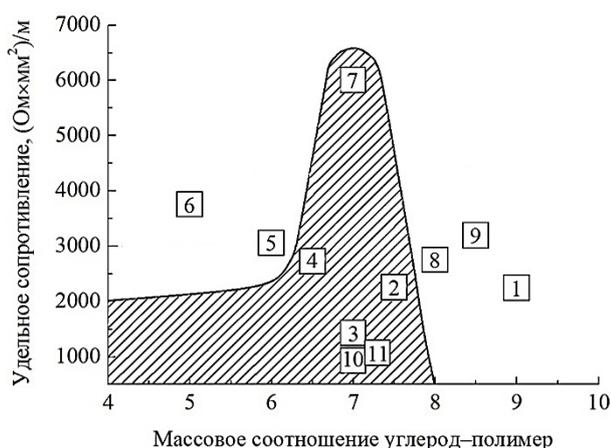


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления электродов от массового соотношения углерода к полимеру в ЭУП. Область пригодности для трафаретной печати выделена штриховкой Fig. 4. Dependence of the specific resistance of the electrodes on the mass ratio of carbon to polymer in the EUP. The area of suitability for screen printing is highlighted by hatching

### ВЫВОДЫ

Исследованные в данной работе электропроводящие углеродные пасты на основе поливинилхлорида могут быть использованы для трафаретной печати различной продукции. Найдены количественные соотношения компонентов в составах паст. Концентрация поливинилхлорида в 5,7 масс.% является достаточной для обеспечения контакта с подложкой и сохранения конфигурации электродов после процесса печати. Также при данной концентрации и при равных значениях общего содержания углеродных добавок достигнуто наименьшее удельное электрическое сопротивление электродов в  $1425 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ . Дальнейшее снижение удельного электрического сопротивления до  $923 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$  достигнуто за счет установленных суммарной концентрации углеродных компонентов и оптимального соотношения между ними. Анализ поверхности полученных электродов методом сканирующей микроскопии позволяет подтвердить, что разработка пасты для трафаретной

печати требует комплексного подхода. В зависимости от желаемых результатов и поставленной цели возможно получение разнообразных электропроводящих углеродных паст с требуемыми свойствами.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят ООО «Компания «ЭЛТА» и лично Ю.Ф. Глухова, З.Ю. Никанорова за помощь в работе и предоставленное оборудование.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСЧУМ «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors are grateful to ELTA Company LLC and personally Yu. F. Glukhov, Z. Yu. Nikanorov for assistance in the work and provided equipment.

The work was carried out FSBI TISNCM Shared-Use Equipment Center "Research of Nanostructured, Carbon and Superhard Materials" equipment.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Suresh R., Lakshmanakumar M., Arockia Jayalatha J. Fabrication of screen-printed electrodes: opportunities and challenges. *J. Mater. Sci.* 2021. V. 56. N 15. P. 8951–9006. DOI: 10.1007/s10853-020-05499-1.
2. Pérez-Fernández B., Costa-García A., Muñiz A. Electrochemical (Bio)Sensors for Pesticides Detection Using Screen-Printed Electrodes. *Biosensors.* 2020. V. 10. 4. DOI: 10.3390/bios10040032.
3. Beitollahi H., Mohammadi S.Z., Safaei M., Tajik S. Applications of electrochemical sensors and biosensors based on modified screen printed electrodes: A review. *Anal. Methods.* 2020. N 12. P. 1547-1560. DOI: 10.1039/c9ay02598g.
4. Taleat Z., Khoshroo A., Mazloum-Ardakani M. Screen-printed electrodes for biosensing: a review (2008–2013). *Microchim Acta.* 2014. V. 181. P. 865–891. DOI: 10.1007/s00604-014-1181-1.
5. Huang H., Su S., Wu N., Wan H., Wan S., Bi H., Sun L. Graphene-Based Sensors for Human Health Monitoring. *Front. Chem.* 2019. V. 7. P. 399. DOI: 10.3389/fchem.2019.00399.
6. Albanese D., Sannini A., Malvano F., Pilloton R., Di Matteo M. Optimisation of Glucose Biosensors Based on Sol-Gel Entrapment and Prussian Blue-Modified Screen-Printed Electrodes for Real Food Analysis. *Food Anal. Methods.* 2014. V. 7. P. 1002–1008. DOI: 10.1007/s12161-013-9705-6.
7. Ping J., Wu J., Ying Y. Development of an ionic liquid modified screen-printed graphite electrode and its sensing in determination of dopamine. *Electrochem. Commun.* 2010. V. 12. N 12. P. 1738–1741. DOI: 10.1016/j.elecom.2010.10.010.

8. **Dhanapala L., Krause C.E., Jones A.L., Rusling J.F.** Printed Electrodes in Microfluidic Arrays for Cancer Biomarker Protein Detection. *Biosensors*. 2020. V. 10. 115. DOI: 10.3390/bios10090115.
9. **Arduini, F., Micheli, L., Moscone, D., Palleschi, G., Piermarini, S., Ricci, F., & Volpe, G.** Electrochemical biosensors based on nanomodified screen-printed electrodes: Recent applications in clinical analysis. *Trends Anal. Chem.* 2016. V. 79. P. 114–126. DOI: 10.1016/j.trac.2016.01.032.
10. **Mincu N.-B., Lazar V., Stan D., Mihailescu C.M., Iosub R., Mateescu A.L.** Screen-Printed Electrodes (SPE) for In Vitro Diagnostic Purpose. *Diagnostics*. 2020. V. 10. 517. DOI: 10.3390/diagnostics10080517.
11. **Chu Z., Peng J., Jin, W.** Advanced nanomaterial inks for screen-printed chemical sensors. *Sens. Actuators. B.* 2017. V. 243. P. 919–926. DOI: 10.1016/j.snb.2016.12.022.
12. **Smart A., Crew A., Pemberton R., Hughes G., Doran O., Hart J. P.** Screen-Printed Carbon Based Biosensors and their Applications in Agri-Food Safety. *Trends Anal. Chem.* 2020. V. 127. 115898. DOI: 10.1016/j.trac.2020.115898.
13. **Wang K., Frewin C., Esrafilzadeh D., Yu C., Wang C., Pancrazio J., Wallace G.** High-Performance Graphene-Fiber-Based Neural Recording Microelectrodes. *Adv. Mater.* 2019. V. 31. N 5. 1805867. DOI: 10.1002/adma.201805867.
14. **Mazzaracchio V., Tomei M., Cacciotti I.** Inside the different types of carbon black as nanomodifiers for screen-printed electrodes. *Electrochim. Acta.* 2019. V. 317. P. 673–683. DOI: 10.1016/j.electacta.2019.05.117.
15. **Svancara I., Walcarius A., Kalcher K., Vytras K.** Carbon paste electrodes in the new millennium. *Cent. Eur. J. Chem.* 2009. V. 7. P. 598–656. DOI: 10.2478/s11532-009-0097-9.
16. **Hernández-Ibáñez N., García-Cruz L., Montiel V., Foster C.W., Banks C.E., Iniesta J.** Electrochemical lactate biosensor based upon chitosan/carbon nanotubes modified screen-printed graphite electrodes for the determination of lactate in embryonic cell cultures. *Biosens. Bioelectron.* 2016. V. 77. P. 1168–1174. DOI: 10.1016/j.bios.2015.11.005.
17. **Kim Y.-R., Bong S., Kang Y.-J., Yang Y., Mahajan R.K., Kim J.S., Kim H.** Electrochemical detection of dopamine in the presence of ascorbic acid using graphene modified electrodes. *Biosens. Bioelectron.* 2010. V. 25. N 10. P. 2366–2369. DOI: 10.1016/j.bios.2010.02.031.
18. **Della Pelle F., Angelini C., Sergi M., Del Carlo M., Pepe A., Compagnone D.** Nano carbon black-based screen printed sensor for carbofuran, isoprocarb, carbaryl and fenobucarb detection: application to grain samples. *Talanta*. 2018. V. 186. P. 389–396. DOI: 10.1016/j.talanta.2018.04.082.
19. **McCreery R.L.** Advanced Carbon Electrode Materials for Molecular Electrochemistry. *Chem. Rev.* 2008. V. 108. N 7. P. 2646–2687. DOI: 10.1021/cr068076m.
20. **Tang Y., Petropoulos K., Kurth F., Gao H., Migliorelli D., Guenat O., Generelli S.** Screen-Printed Glucose Sensors Modified with Culture Monitoring. *Biosensors*. 2020. V. 10. 125. DOI: 10.3390/bios10090125.
21. **García-Miranda Ferrari A., Elbardsy H.M., Silva V., Belal T.S., Talaat W., Daabees H.G., Brownson D.A.C.** The influence of lateral flake size in graphene/graphite paste electrodes: an electroanalytical investigation. *Anal. Methods*. 2020. V. 12. 16. DOI: 10.1039/d0ay00169d.
22. **Хан Ю.А., Дьячкова Т.П., Буракова Е.А., Сухинин А.А., Титов Г.А., Дегтярев А.А.** Формирование гибридных частиц при взаимодействии углеродных наноструктур различной морфологии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 59–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.6907.
23. **Кхан Ю.А., Дьячкова Т.П., Буракова Е.А., Сухинин А.А., Титов Г.А., Дегтярев А.А.** Formation of hybrid particles in the interaction of different carbon nanostructures. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 10. P. 59–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.6907.
23. **Грязнова М.И., Лугвищук Д.С., Грязнов К.О., Филимонов И.С., Митберг Э.Б., Караева А.Р., Мордкович В.З.** Применение терморасширенного графита в пастах для трафаретной печати электрохимических сенсоров. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 59–64. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.3y.
- Griaznova M.I., Lugvishchuk D.S., Gryaznov K.O., Filimonov I.S., Mitberg E.B., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z.** Exfoliated graphite application in pastes for screen printed electrochemical sensors. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 59–64. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.3y.

Поступила в редакцию 24.04.2024

Принята к опубликованию 20.05.2024

Received 24.04.2024

Accepted 20.05.2024