ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2482
https://elibrary.ru/ROCSEV

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Электрохимические сенсоры на основе сеток из однослойных углеродных нанотрубок для вольтамперометрического определения аскорбиновой кислоты

Н. В. Иванова, Е. А. Мартынова, А. И. Вершинина, М. В. Ломакин, Г. О. Еремеева, О. Р. Гордая, С. Д. Шандаков*

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 11.10.2023
Принята после рецензирования: 15.11.2023
Принята к публикации: 05.12.2023

**С. Д. Шандаков: sergey.shandakov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7902-1178*
Н. В. Иванова: https://orcid.org/0000-0002-6206-3504
А. И. Вершинина: https://orcid.org/0000-0001-6561-0924
М. В. Ломакин: https://orcid.org/0000-0001-6544-3687
Г. О. Еремеева: https://orcid.org/0000-0003-0188-0065
О. Р. Гордая: https://orcid.org/0000-0002-9293-9271

© Н. В. Иванова, Е. А. Мартынова, А. И. Вершинина, М. В. Ломакин, Г. О. Еремеева, О. Р. Гордая, С. Д. Шандаков, 2023

Аннотация.
Создание высокочувствительных и селективных сенсорных систем для определения биологически активных веществ является одним из важнейших направлений развития современной аналитической химии. В работе представлены результаты исследования электрохимических свойств новых волоконных материалов на основе сеток из однослойных углеродных нанотрубок, предназначенных для изготовления сенсоров для определения содержания аскорбиновой кислоты методом вольтамперометрии.
Разработана технология синтеза сеток из разупорядоченных однослойных углеродных нанотрубок методом химического осаждения из газовой фазы и изготовления волокон методом мокрого вытягивания сеток однослойных углеродных нанотрубок из растворителя. Оптимизирована методика подготовки сеток и волокон, сочетающая отжиг на воздухе и обработку сильными неорганическими кислотами. Экспериментально выбраны условия регистрации вольтамперных кривых (фоновый электролит, скорость развертки, условия предварительного кондиционирования) для получения максимального отклика сенсора на содержание аскорбиновой кислоты. Ток и площадь пика окисления аскорбиновой кислоты не зависят от времени и потенциала кондиционирования сенсора. Линейные зависимости этих параметров от концентрации аскорбиновой кислоты в фосфатном буферном электролите наблюдаются в диапазоне 50–500 μмоль/л (8,8–90 мг/л) при скорости сканирования 0,1 мВ/с. Чувствительность миниатюрного волоконного сенсора из сеток однослойных углеродных нанотрубок длиной 0,5 см и средней шириной 400 мкм в два раза выше чувствительности дискового стеклоуглеродного электрода диаметром 5 мм.
Достигнутые показатели позволяют использовать сенсоры для определения аскорбиновой кислоты в пищевых продуктах, фармацевтических препаратах и биологических жидкостях.

Ключевые слова. Углеродные нанотрубки, сенсоры, вольтамперометрия, аскорбиновая кислота

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) (проект № FZSR-2020-0007 в рамках государственного задания № 075-03-2020-097/1).

Для цитирования: Электрохимические сенсоры на основе сеток из однослойных углеродных нанотрубок для вольтамперометрического определения аскорбиновой кислоты / Н. В. Иванова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 4. С. 824–831. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2482

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2482
https://elibrary.ru/ROCSEV

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Electrochemical Sensors Based on Single-Wall Carbon Nanotubes in Voltammetric Ascorbic Acid Tests

Natalia V. Ivanova, Elizaveta A. Martynova, Anna I. Vershinina, Maksim V. Lomakin, Galina O. Eremeeva, Olesya R. Gordaya, Sergey D. Shandakov*

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 11.10.2023
Revised: 15.11.2023
Accepted: 05.12.2023

**Sergey D. Shandakov: sergey.shandakov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7902-1178*
Natalia V. Ivanova: https://orcid.org/0000-0002-6206-3504
Anna I. Vershinina: https://orcid.org/0000-0001-6561-0924
Maksim V. Lomakin: https://orcid.org/0000-0001-6544-3687
Galina O. Eremeeva: https://orcid.org/0000-0003-0188-0065
Olesya R. Gordaya: https://orcid.org/0000-0002-9293-9271

© N.V. Ivanova, E.A. Martynova, A.I. Vershinina, M.V. Lomakin, G.O. Eremeeva, O.R. Gordaya, S.D. Shandakov, 2023

Abstract.
Modern highly sensitive and selective sensors are able to determine biologically active substances, which makes this direction one of the most popular areas of analytical chemistry. The study featured the electrochemical properties of new fiber materials based on single-wall carbon nanotubes with prospects of using them in the voltammetry of ascorbic acid.
The authors developed a new technology to synthesize films from disordered single-wall carbon nanotubes by chemical vapor deposition. Fibers were produced from a solvent by wet-pulling of single-wall carbon nanotubes networks. Thin films of randomly oriented single-wall carbon nanotube bundles were deposited downstream of a floating aerosol CVD reactor, which included a high temperature furnace with a quartz tube. The synthesis of the single-wall carbon nanotube samples was performed at 825°C. Ethanol served as carbon source while ferrocene was used as catalyst precursor. The single-wall carbon nanotubes were collected on a nitrocellulose filter in the form of films with transmittances of 10% in the middle of the visible wavelength (550 nm). The method was optimized to involve air annealing at 300–320°C and a treatment with strong inorganic acids, i.e., HCl, $HNO_3 + H_2SO_4$. The voltammetric curves recording included background electrolyte, scan rate, and preconditioning. These parameters were selected experimentally to obtain the maximal sensor response to ascorbic acid content. The anodic peak of ascorbic acid in the phosphate buffer electrolyte (pH 6.86) was observed at a potential of +0.2 V. The current and peak area of ascorbic acid oxidation depended neither on the time nor on the conditioning potential of the sensor. The linear dependences of these parameters on the concentration of ascorbic acid stayed within 50–500 μmol/L (8.8–90 mg/L) at a scan rate of 0.1 mV/s. The single-wall carbon nanotube microsensor had a length of 0.5 cm and an average width of 400 μm. Its sensitivity was two times as high as that of a disk glassy carbon electrode with a diameter of 5 mm.
The experimental sensors proved effective in determining ascorbic acid in food products, pharmaceuticals, and biological fluids.

Keywords. Carbon nanotubes, sensors, voltammetry, ascorbic acid

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki): project no. FZSR-2020-0007, state assignment no. 075-03-2020-097/1.

For citation: Ivanova NV, Martynova EA, Vershinina AI, Lomakin MV, Eremeeva GO, Gordaya OR, *et al*. Electrochemical Sensors Based on Single-Wall Carbon Nanotubes in Voltammetric Ascorbic Acid Tests. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):824–831. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2482

Введение

Открытие углеродных нанотрубок привело к возникновению нового направления в электроанализе, связанного с исследованием электрохимических характеристик углеродных нанотрубок и возможности их применения для определения различных веществ. По сравнению с массивными углеродными материалами, такими как стеклоуглерод и графит, преимущества углеродных нанотрубок связаны с высокой адсорбционной активностью, развитой поверхностью и высокой скоростью переноса заряда при осуществлении электродных процессов. Указанные

особенности делают углеродные нанотрубки материалом выбора для использования в качестве активной поверхности индикаторного электрода-сенсора в вольтамперометрическом анализе органических веществ.

Разработка электрохимических сенсорных систем является активно развивающейся областью современной аналитической химии. Об этом свидетельствует высокая публикационная активность на протяжении последних десятилетий [1, 2]. Большинство представленных в литературе способов использования углеродных нанотрубок связано с их нанесением на поверхность инертного электрода и дальнейшей модификацией [1–6]. Это усложняет методику изготовления и приводит к снижению воспроизводимости результатов и срока службы получаемого сенсора. Электроды, полученные путем нанесения или выращивания углеродных нанотрубок на проводящей поверхности или путем печати, демонстрируют помехи от материала подложки. Также для них характерно неравномерное покрытие углеродных нанотрубок, снижение отклика во времени и влияние любого модификатора на физико-химические характеристики углеродных нанотрубок. Поэтому актуальной задачей является создание электродных материалов на основе несвязанных с подложкой сеток или волокон из углеродных нанотрубок. Анализ литературных данных показал наличие публикаций, авторы которых рассматривают использование единичных волокон/пучков из углеродных нанотрубок в исходном состоянии и волокон, полученных методом прядения [7–10].

В данной работе рассматривается возможность применения метода мокрого вытягивания для формирования прочных волокон из сеток однослойных углеродных нанотрубок, полученных методом аэрозольного осаждения из газовой фазы [11, 12]. Электроды-сенсоры из волокон указанного типа предлагается использовать для определения методом вольтамперометрии содержания аскорбиновой кислоты в различных объектах: продуктах питания и сырье, лекарственных средствах и биологических жидкостях.

Аскорбиновая кислота известна своими антиоксидантными свойствами. Она является жизненно необходимым для функционирования живых организмов веществом, т. к. играет важную роль в регуляции окислительно-восстановительных процессов и участвует в синтезе коллагена и проколлагена, обмене фолиевой кислоты и железа, а также в синтезе стероидных гормонов и катехоламинов. В пищевые продукты это вещество добавляют для увеличения срока годности и повышения витаминной ценности, в частности при производстве специальных и диетических продуктов и продуктов детского питания.

Среди существующих методов определения аскорбиновой кислоты вольтамперометрический анализ отличается высокой чувствительностью, экономичностью и экспрессностью, а варьирование типов электродных материалов позволяет повысить селективность определения. Например, предложены методики вольтамперометрического определения аскорбиновой кислоты с использованием сложных сенсорных систем на основе различных углеродных нанокомпозитов и наногибридов, слоистых наноструктур и материалов, модифицированных металлами и их оксидами [5, 6, 13–24].

Целью исследования являлась разработка новых миниатюрных сенсоров на основе однослойных углеродных нанотрубок, отличающихся увеличенным сроком эксплуатации и не содержащих модификаторов и допантов.

Объекты и методы исследования

Сетки однослойных углеродных нанотрубок, используемые для изготовления волокна, которое послужит электродным материалом, получали с помощью метода химического осаждения из газовой фазы. Для этого в качестве источника углерода использовался этанол (95,6 % purity), в качестве прекурсора катализатора – раствор ферроцена в этананоле ($C_{10}H_{10}Fe$, 98 % purity Sigma Aldrich). Раствор ферроцена в этаноле подавались в кварцевый трубчатый реактор при температуре 825 °C [11–13]. Однослойные углеродные нанотрубки собирались на нитроцеллюлозный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм (Millipore Corp). Светопропускание сеток составило 10 % при длине волны 550 нм.

Из фильтра с сеткой однослойных углеродных нанотрубок вырезались полоски 0,5×2 см, которые помещались на кварцевое стекло марки КС-4В. Стекло с нанесенными сетками однослойных углеродных нанотрубок нагревали в трубчатой печи Nabertherm до 300–320 °C на воздухе при скорости нагрева 8 °C/мин. Сетки на стекле охлаждали до комнатной температуры, наносили 0,1 мл HCl (35,1 %) и оставляли на 1 ч. Образцы промывали дистиллированной водой и оставляли до полного высыхания при комнатной температуре. Метод мокрого вытягивания позволяет получать углеродные волокна путем самосборки сетки из однослойных углеродных нанотрубок за счет слабого ван-дер-ваальсова взаимодействия и сил поверхностного натяжения, возникающих при смачивании жидкостью [12, 13]. Из полиэтилентерефталата подготавливалась специальная рамка с отверстием и медным контактом. Волокно помещалось в эту рамку и его концы закреплялись с помощью термозапаивания при температуре 110–120 °C (рис. 1). Толщина волокон варьировалась в пределах 400–550 мкм. Длина рабочей поверхности волокна 0,5–2 см.

Электрохимические исследования проводили с использованием потенциостата/гальваностата VersaSTAT 3 в трехэлектродном режиме с индикаторным электродом (сенсором из сетки однослойных углеродных нанотрубок), стеклоуглеродным вспомогатель-

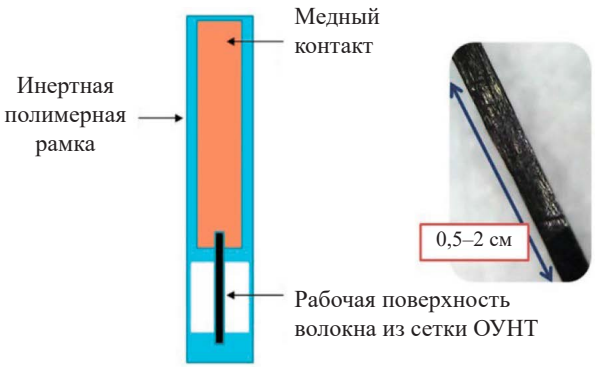

Рисунок 1. Конструкция волоконного сенсора из сетки однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и фотография рабочей поверхности волокна

Figure 1. Fiber sensor made from a network of single-wall carbon nanotubes: working fiber surface

ным электродом и хлоридсеребряным электродом сравнения (Ag/AgCl/0,1 M KCl). Стандартный раствор аскорбиновой кислоты готовился по точной навеске, стандартизация раствора проводилась методом иодометрического титрования. В качестве фонового электролита использовался фосфатный буферный раствор с pH 6,86. Оптимизировали условия проведения электрохимического эксперимента, включающие этапы последовательного циклирования потенциала в диапазоне от –0,5 до +1,0 В, катодного выдерживания при –0,5 В с перемешиванием раствора и регистрации циклических вольтамперных кривых.

Результаты и их обсуждение

Электрохимический отклик электродов для вольтамперометрического анализа зависит от многих факторов. Поэтому на этапе создания сенсоров важно оптимизировать не только условия получения однослойных углеродных нанотрубок и их постобработки, но и условия проведения регистрации сигнала (рис. 2).

В массиве однослойных углеродных нанотрубок после синтеза содержатся остатки катализатора, аморфный углерод и ряд органических соединений. Например, полициклические ароматические углеводороды. Волокна без предварительной очистки демонстрируют высокие фоновые токи. Также наблюдаются анодно-катодные максимумы в положительной области потенциалов от 0 до +900 мВ, характерные для соединений железа и кислородсодержащих функциональных групп. В связи с этим разработали методику очистки сеток и волокон, состоящую из следующих этапов: отжиг на воздухе при температуре 300 °C; обработка концентрированной соляной кислотой; обработка разбавленной нитрующей смесью (1:10) при нагревании.

Фоновые циклические вольтамперные кривые, полученные для подготовленных волоконных электродов в кислом электролите, показывают, что они характеризуются широкой областью рабочих потенциалов: от –0,7 до 1,0 В. В нейтральных и щелочных средах эта область увеличивается и находится в пределах от –1,2 до +0,9 В.

Установлено, что исходные волокна из-за своей гидрофобности непригодны для использования без предварительной процедуры кондиционирования. Данная процедура заключается в выдерживании в этиловом либо изопропиловом спирте, бидистиллированной воде, а затем в многократном медленном циклировании (v = 10–20 мВ/с) в кислом электролите в условиях постепенного увеличения потенциального окна.

На качество получаемых электродных материалов влияет растворитель, из которого вытягиваются волокна. Механически прочные волокна получаются

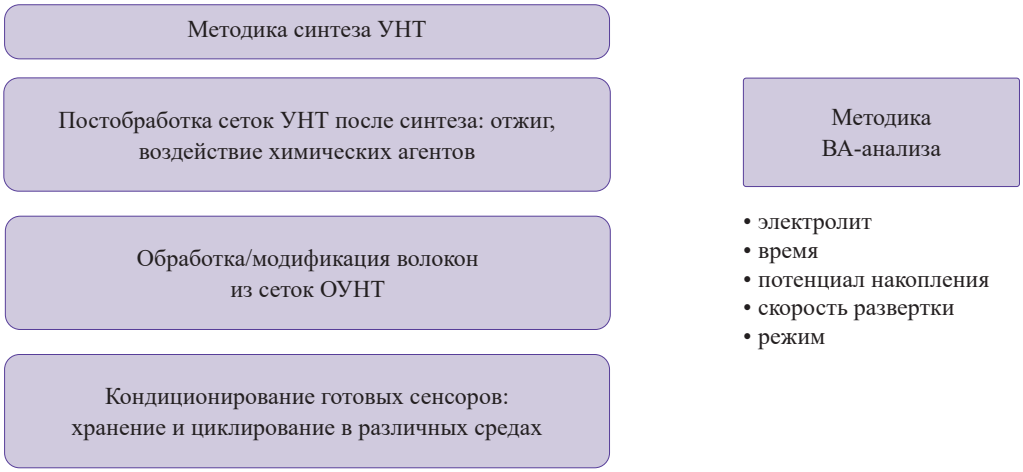

Рисунок 2. Факторы, влияющие на отклик волоконных сенсоров из однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ)

Figure 2. Factors affecting the response of single-wall carbon nanotube fiber sensors

при вытягивании из ацетона, а не из этанола, т. к. ацетон способствует лучшей очистке волокна от остатков органических примесей, не удаленных на предшествующих этапах. После изготовления электроды-сенсоры выдерживались в 0,1 М HCl в течение нескольких часов. Затем производилось электрохимическое кондиционирование электродов сначала при постоянном перемешивании: многократное циклирование в диапазоне потенциалов от 0 до 1,0 В со сменой фонового электролита (0,1 М HCl), а затем с катодным восстановлением при –0,8 В. После всех вышеперечисленных процедур делался вывод о пригодности электрода к работе. При наличии дополнительных сигналов на вольтамперометрических кривых электроды подвергались дополнительной очистке путем нагревания и обработки изопропиловым спиртом.

Анодный сигнал аскорбиновой кислоты, зарегистрированный с использованием сенсора из однослойных углеродных нанотрубок, имеет характерный вид пика (рис. 3), парный сигнал при катодном сканировании отсутствует. Следовательно, процесс окисления аскорбиновой кислоты происходит необратимо. Параметры пика окисления практически не изменяются после проведения катодного восстановления.

Согласно литературным данным аскорбиновая кислота окисляется в нейтральных средах с образованием дегидроаскорбиновой кислоты (рис. 4) [16–18].

Вследствие того что ионы водорода принимают участие в электродном процессе, положение пика окисления аскорбиновой кислоты зависит от pH среды. При подкислении происходит смещение пика в анодную область. В 0,1 М растворе хлороводородной кислоты потенциал пика составляет +0,75 В, в фосфатной буферной среде с pH 6,86 пик наблюдается при потенциале +0,16 В для одинаковой концентрации аскорбиновой кислоты 70 мкмоль/л.

Исследование влияния вольтамперометрических параметров показало, что потенциал и время предварительного катодного выдерживания не влияют на характеристики ($I_{пика}$, $S_{пика}$, $E_{пика}$) сигналов аскорбиновой кислоты. Следовательно, концентрирования аскорбиновой кислоты на поверхности электрода не происходит (табл. 1), и для анализа следует использовать вариант прямой вольтамперометрии. Ток пика окисления аскорбиновой кислоты пропорционален корню квадратному из скорости сканирования потенциала, что соответствует теоретическим закономерностям для указанного варианта вольтамперометрии в рамках подхода Рэндлса-Шевчика [25]. В качестве оптимальных использовались следующие условия: диапазон сканирования потенциалов от –0,5 В до +1,0 В, время выдерживания электрода при начальном потенциале 40 с, скорость сканирования 0,1 В/с.

Зависимость максимального тока и площади пика от концентрации аскорбиновой кислоты в растворе представлена на рисунке 5. Полученные калибровочные

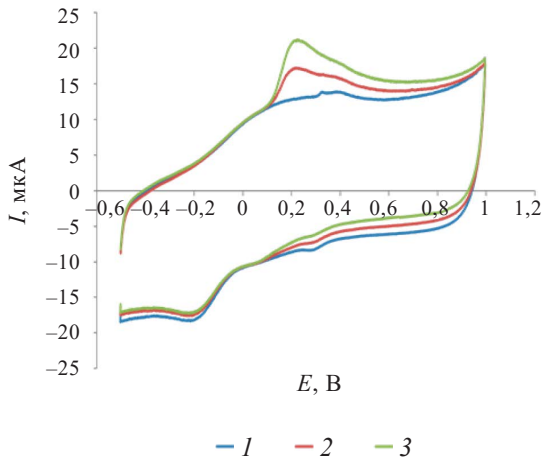

Рисунок 3. Циклические вольтамперные кривые, зарегистрированные с использованием волоконных сенсоров из однослойных углеродных нанотрубок в фосфатном буферном электролите (*1*) с добавками стандартных растворов аскорбиновой кислоты, мкМ (мг/л): *2* – 200 (35); *3* – 400 (75)

Figure 3. Cyclic voltammetric curves recorded using fiber sensors made of single-wall carbon nanotubes in a phosphate buffer electrolyte (*1*) with standard solutions of ascorbic acid, μM (mg/L): *2* – 200 (35); *3* – 400 (75)

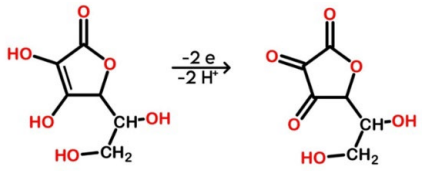

Рисунок 4. Схема процесса анодного окисления аскорбиновой кислоты

Figure 4. Anodic oxidation of ascorbic acid

Таблица 1. Влияние времени и потенциала кондиционирования сенсора на параметры анодного пика аскорбиновой кислоты в фосфатном буферном электролите

Table 1. Effect of sensor conditioning time and potential on the anodic peak of ascorbic acid in phosphate buffer electrolyte

t, с	*I*, нА	± *C**, нА	*S*, нКл	± *C*, нКл	*E*, мВ
0	932	10	948	11	158
10	928	9	952	12	158
40	946	12	986	10	160
80	935	9	957	9	161
–*E*, с	*I*, нА	± *C*, нА	*S*, нКл	± *C*, нКл	*E*, мВ
500	955	4	980	7	161
400	956	5	978	6	160
300	959	3	978	6	160
200	956	4	986	8	160
100	959	5	983	7	161

* доверительный интервал.

*confidence interval.

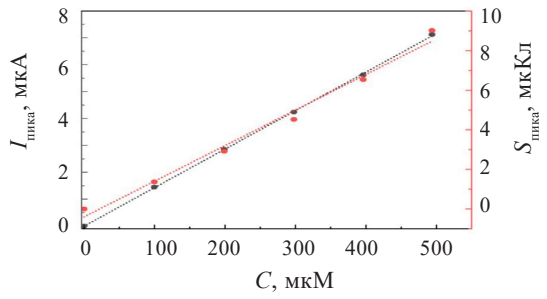

Рисунок 5. Калибровочные зависимости тока пика и площади пика от концентрации аскорбиновой кислоты, полученные с использованием волоконного сенсора из однослойных углеродных нанотрубок в фосфатном буферном электролите с pH 6,86

Figure 5. Peak current and peak area vs. concentration: calibration dependences obtained using a single-walled carbon nanotube fiber sensor in a phosphate buffer electrolyte with pH 6.86

зависимости линейны. Следовательно, волоконные сенсоры из однослойных углеродных нанотрубок пригодны для проведения вольтамперометрического анализа на содержание аскорбиновой кислоты.

Провели сравнительные испытания характеристик волоконных сенсоров однослойных углеродных нанотрубок и дисковых стеклоуглеродных электродов с диаметром рабочей поверхности d = 5 мм в идентичных условиях, которые показали пропорциональное изменение силы тока (в мкА) пиков окисления аскорбиновой кислоты от ее концентрации (в мкмоль/л) с коэффициентами пропорциональности $1{,}43 \pm 0{,}02\times10^{-2}$ и $8{,}6 \pm 0{,}5\times10^{-3}$ для однослойных углеродных нанотрубок и стеклоуглеродных электродов соответственно.

Таким образом, миниатюрный волоконный сенсор из сеток однослойных углеродных нанотрубок демонстрирует большую чувствительность вольтамперометрического определения аскорбиновой кислоты, чем электрод из стеклоуглерода. Кроме того, величины относительных стандартных отклонений для токов пиков в серии измерений в случае сенсоров однослойных углеродных нанотрубок не превышают 0,6 %, а для стеклоуглеродных электродов эти величины находятся в пределах 2–3 %.

Сенсоры демонстрируют высокую сходимость величин токов и площадей пиков при проведении долговременных испытаний. Провели исследование стабильности отклика сенсора в серии из 20 регистраций величины аналитического сигнала – пика аскорбиновой кислоты. Рассчитали границы доверительного интервала: при доверительной вероятности 0,95 ток пика равен 2,85 ± 0,05 мкА для содержания аскорбиновой кислоты 200 мкмоль/л.

Выводы

Проведенные эксперименты показали возможность использования сенсоров на основе нового электродного материала – волокон из сеток однослойных углеродных нанотрубок для электрохимического определения аскорбиновой кислоты в варианте линейной анодной постояннотоковой вольтамперометрии без накопления. Установили оптимальные условия подготовки сеток и волокон, обеспечивающие максимальный отклик и его воспроизводимость в течение длительного времени. Проведена оптимизация условий вольтамперометрического определения аскорбиновой кислоты с использованием электрода из сеток однослойных углеродных нанотрубок: исследуемый диапазон потенциалов от –0,5 до +1,0 В, время выдерживания при начальном потенциале 40 с, скорость сканирования 0,1 В/с. Линейность отклика на содержание аскорбиновой кислоты наблюдается в диапазонах концентраций 50–500 мкМ (8,8–88 мг/л).

Критерии авторства

С. Д. Шандаков – руководство работой, обсуждение результатов (20 %). Н. В. Иванова – руководство работой и анализ результатов (20 %). Е. А. Мартынова – выполнение экспериментов, анализ результатов (20 %). А. И. Вершинина – выполнение экспериментов (10 %). М. В. Ломакин – выполнение экспериментов (10 %). Г. О. Еремеева – консультирование (10 %). О. Р. Гордая – обработка результатов (10 %).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.D. Shandakov (20%) and N.V. Ivanova (20%) supervised the research and analyzed the results. E.A. Martynova (20%), A.I. Vershinina (10%), and M.V. Lomakin (10%) performed the experiments and analyzed the obtained data. G.O. Eremeeva (10%) provided scientific consultations. O.R. Gordaya (10%) was responsible for data processing.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Baig N, Sajid M, Saleh TA. Recent trends in nanomaterial-modified electrodes for electroanalytical applications. Trends in Analytical Chemistry. 2019;111:47–61. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.044

2. Gupta P, Rahm CE, Griesmer B, Alvarez NT. Carbon nanotube microelectrode set: Detection of biomolecules to heavy metals. Analytical Chemistry. 2021;93(20):7439–7448. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c00360

3. Tu Y, Lin Y, Ren ZF. Nanoelectrode arrays based on low site density aligned carbon nanotubes. Nano Letters. 2003;3(1):107–109. https://doi.org/10.1021/nl025879q

4. Duzmen S, Baytak AK, Aslanoglu M. A novel voltammetric platform composed of poly(aminopyrazine), ZrO_2 and CNTs for a rapid, sensitive and selective determination of ascorbic acid in pharmaceuticals and food samples. Materials Chemistry and Physics. 2020;252. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123170

5. Pan PAN, Shou-Guo WU. Direct determination of ascorbic acid in fruits and vegetables by positive scan polarization reverse catalytic voltammetry. Chinese Journal of Analytical Chemistry. 2019;47(8):e19088–e19094. https://doi.org/10.1016/S1872-2040(19)61175-8

6. Muqaddas S, Aslam H, Hassan SU, Ashraf AR, *et al.* Electrochemical sensing of glucose and ascorbic acid via POM-based CNTs fiber electrode. Materials Science and Engineering: B. 2023;293. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116446

7. Nugent JM, Santhanam KSV, Rubio A, Ajayan PM. Fast electron transfer kinetics on multiwalled carbon nanotube microbundle electrodes. Nano Letters. 2001;1(2):87–91. https://doi.org/10.1021/nl005521z

8. Gong K, Chakrabarti S, Dai L. Electrochemistry at carbon nanotube electrodes: Is the nanotube tip more active than the sidewall? Angewandte Chemie International Edition. 2008;47(29):5446–5450. https://doi.org/10.1002/anie.200801744

9. Harreither W, Trouillon R, Poulin P, Neri W, Ewing AG, Safina G. Carbon nanotube fiber microelectrodes show a higher resistance to dopamine fouling. Analytical Chemistry. 2013;85(15):7447–7453. https://doi.org/10.1021/ac401399s

10. Yang C, Trikantzopoulos E, Jacobs CB, Venton BJ. Evaluation of carbon nanotube fiber microelectrodes for neurotransmitter detection: Correlation of electrochemical performance and surface properties. Analytica Chimica Acta. 2017;965;1–8. https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.01.039

11. Shandakov SD, Kosobutsky AV, Vershinina AI, Sevostyanov OG, Chirkova IM, Russakov DM, *et al.* Electromechanical properties of fibers produced from randomly oriented SWCNT films by wet pulling technique. Materials Science and Engineering: B. 2021;269. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115178

12. Zhilyaeva MA, Shulga EV, Shandakov SD, Sergeichev IV, Gilshteyn EP, Anisimov AS, *et al.* A novel straightforward wet pulling technique to fabricate carbon nanotube fibers. Carbon. 2019;150:69–75. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.111

13. Moisala A, Nasibulin AG, Shandakov SD, Jiang H, Kauppinen EI. On-line detection of single-walled carbon nanotube formation during aerosol synthesis methods. Carbon. 2005;43(10):2066–2074. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.03.012

14. Zhang W, Chen J, Li Y, *et al.* Novel UIO-66-NO_2@XC-72 nanohybrid as an electrode material for simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine and uric acid. RSC Advances. 2017;7(10):5628–5635. https://doi.org/10.1039/C6RA26933H

15. Ma C, Xu P, Chen H, Cui J, Guo M, Zhao J. An electrochemical sensor based on reduced graphene oxide/*β*-cyclodextrin/multiwall carbon nanotubes/polyoxometalate tetracomponent hybrid: Simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine and uric acid. Microchemical Journal. 2022;180. https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107533

16. Filik H, Avan AA, Aydar S. Simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine, uric acid and tryptophan with Azure A-interlinked multi-walled carbon nanotube/gold nanoparticles composite modified electrode. Arabian Journal of Chemistry. 2016;9(3):471–480. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.01.014

17. Peng X, Xie Y, Du Y, Song Y, Chen S. Simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine and uric acid based on vertical *N*-doped carbon nanosheets/three-dimensional porous carbon. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2022;904. https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115850

18. Hsine Z, Bizid S, Mlika R, Sauriat-Dorizon H, Haj Said A, Korri-Youssoufi H. Nanocomposite based on poly (para-phenylene)/chemical reduced graphene oxide as a platform for simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine and uric acid. Sensors. 2020;20(5). https://doi.org/10.3390/s20051256

19. Li H, Wang Y, Ye D, Luo J, Su B, Zhang S, *et al.* An electrochemical sensor for simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine, uric acid and tryptophan based on MWNTs bridged mesocellular graphene foam nanocomposite. Talanta. 2014;127:255–261. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.03.034

20. Aryal KP, Jeong HK. Carbon nanofiber modified with reduced graphite oxide for detection of ascorbic acid, dopamine, and uric acid. Chemical Physics Letters. 2020;739. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.136969

21. Wang Y, Yang T, Hasebe Y, Zhang Z, Tao D. Carbon black-carbon nanotube co-doped polyimide sensors for simultaneous determination of ascorbic acid, uric acid, and dopamine. Materials. 2018;11(9). https://doi.org/10.3390/ma11091691

22. Fernandes DM, Costa M, Pereira C, Bachiller-Baeza B, Rodríguez-Ramos I, *et al.* Novel electrochemical sensor based on N-doped carbon nanotubes and Fe_3O_4 nanoparticles: Simultaneous voltammetric determination of ascorbic acid, dopamine and uric acid. Journal of Colloid and Interface Science. 2014;432:207–213. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.06.050

23. Iranmanesh T, Foroughi MM, Jahani S, Zandi MS, Nadiki HH. Green and facile microwave solvent-free synthesis of CeO_2 nanoparticle-decorated CNTs as a quadruplet electrochemical platform for ultrasensitive and simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine, uric acid and acetaminophen. Talanta. 2020;207. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120318

24. Singh A, Sharma A, Arya S. Electrochemical sensing of ascorbic acid (AA) from human sweat using Ni–SnO_2 modified wearable electrode. Inorganic Chemistry Communications. 2023;152. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110718

25. Compton RG, Banks CE. Understanding voltammetry. World Scientific, 2007. 371 p.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» предназначен для публикации статей, посвященных проблемам пищевой и смежных отраслей промышленности.

Статья должна отвечать профилю журнала, обладать научной новизной, публиковаться впервые.

Рукопись научной статьи, поступившая в редакцию журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)», рассматривается ответственным за выпуск на предмет соответствия профилю журнала и требованиям к оформлению, проверяется оригинальность представленного текста с помощью интернет-ресурсов – www.antiplagiat.ru и www.ithenticate.com, регистрируется.

В журнале публикуются только рукописи, текст которых рекомендован рецензентами.

Редакция организует «двухстороннее слепое» (анонимное) рецензирование представленных рукописей с целью их экспертной оценки. Выбор рецензента осуществляется решением главного редактора или его заместителя. Для проведения рецензирования рукописей статей в качестве рецензентов могут привлекаться как члены редакционной коллегии журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)», так и высококвалифицированные ученые и специалисты других организаций и предприятий, обладающие глубокими профессиональными знаниями и опытом работы по конкретному научному направлению, как правило, доктора наук, профессора. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи.

Рецензенты уведомляются о том, что присланные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению. Рецензентам не разрешается делать копии статей для своих нужд. Рецензирование проводится конфиденциально. Нарушение конфиденциальности возможно только в случае заявления рецензента о недостоверности или фальсификации материалов, изложенных в статье.

Срок рассмотрения статьи не должен превышать трех месяцев со дня получения статьи на рецензирование.

Оригиналы рецензий хранятся в издательстве и в редакции издания в течение пяти лет со дня публикации статей.

Если в рецензии на статью имеется указание на необходимость ее исправления, то статья направляется автору на доработку.

Если статья по рекомендации рецензента подверглась значительной авторской переработке, то она направляется на повторное рецензирование тому же рецензенту, который сделал критические замечания.

Редакция оставляет за собой право отклонения статей в случае неспособности или нежелания автора учесть пожелания редакции.

При наличии отрицательных рецензий на рукопись от двух разных рецензентов или одной рецензии на ее доработанный вариант статья отклоняется от публикации без рассмотрения другими членами редколлегии. Автору не принятой к публикации статьи ответственный за выпуск направляет мотивированный отказ. Фамилия рецензента может быть сообщена автору лишь с согласия рецензента.

Решение о возможности публикации после рецензирования принимается главным редактором, а при необходимости – редколлегией в целом.

Редакция журнала направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

Редакция журнала не хранит рукописи, не принятые к печати. Рукописи, принятые к публикации, не возвращаются. Рукописи, получившие отрицательный результат от рецензента, не публикуются и также не возвращаются обратно автору.

Рукописи печатаются, как правило, в порядке очередности их поступления в редакцию. В исключительных случаях, редакционная коллегия имеет право изменить очередность публикации статей.

Все материалы журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» распространяются на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Объем статьи должен быть не менее 35–40 тыс. знаков (не включая списки литературы на русском и английском языках). Объем обзорной рукописи – более 40 тыс. знаков.

Оформление текста (форматирование): поля по 20 мм, одинарный интервал без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов, шрифт Times New Roman, 10 кегль. Следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, дублирования одних и тех же результатов в таблицах и графиках.

Графики, диаграммы и т. п. (желательно цветные), созданные средствами MicrosoftOffice и Corel Draw, должны допускать возможность редактирования и направляются в редакцию отдельными файлами в форматах tiff, jpeg, cdr, excel.

Каждая таблица, график, диаграмма и т. п. должны иметь заголовки и порядковые номера, в тексте статьи должны присутствовать ссылки на каждую из них.

Структура статьи:

1. Тип статьи;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилии всех авторов;
4. Официальное полное название учреждения;
5. E-mail автора, с которым следует вести переписку;
6. Аннотация (разбивается на разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);
7. Ключевые слова;
8. Финансирование;
9. Текст статьи (обязательные разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);
10. Критерий авторства;
11. Конфликт интересов;
12. Благодарности;
13. Список литературы;
14. Список литературы (References);
15. Сведения об авторах (на русском и английском языках).

Подать рукопись можно на сайте журнала https://fptt.ru или отправив на e-mail fptt98@gmail.com

В редакцию предоставляются:

1. Электронная версия статьи в программе MSWord. Файл статьи следует назвать по фамилии первого автора – ПетровГП.doc. Не допускается в одном файле помещать несколько документов;
2. Сканированная электронная версия статьи, подписанная всеми авторами, в программе PDF. Файл статьи следует назвать по фамилии первого автора – ПетровГП.pdf. Не допускается в одном файле помещать несколько документов;
3. Гарантийное письмо (скан-копия) на имя главного редактора журнала на бланке направляющей организации с указанием даты регистрации и исходящего номера, с заключением об актуальности работы и рекомендациями к опубликованию, с подписью руководителя учреждения;
4. Издательский лицензионный договор.

Более подробная информация на https://fptt.ru.