

УДК 502/504

¹*Мозаффарі Настаран, магістр-інженер, докторант, ¹Мозаффарі Нілуфар, магістр дослідник, докторант, ²Телу Стефан, к. т. н., доцент,*

³*Сілланья Міка, доктор наук, професор,*

^{4,5}*Вамболь В. В., д. т. н., професор, ⁶Вамболь С. О., д. т. н., професор*

¹*Університет Лаваля, м. Квебек, Канада.*

²*Технічний університет Клуж-Напока, м. Клуж-Напока, округ Клуж, Румунія*

³*Університет Йоганнесбургу, м. Йоганнесбург, Південна Африка*

⁴*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна;*

⁵*Люблінський університет природничих наук, Люблін, Польща*

⁶*Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків, Україна*

ВИКОРИСТАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ДЛЯ БІОСЕНСОРІВ У ДЖЕРЕЛАХ ПИТНОЇ ВОДИ

Біосенсори як аналітичні системи поєднують біологічні або біометричні матеріали з фізико-хімічним або мікросистемним датчиком [1]. Вони мають переваги перед звичайними методами або пакетними системами тестування, оскільки є дешевими, мають високий рівень здатності виявлення забруднюючих речовин [2]. Загалом існує багато різних технологій, серед яких є біосенсори для визначення кількості фармацевтичних препаратів у воді та стічних водах. Однією з головних переваг біосенсорів здатність виявляти фармацевтичні препарати і мікробні забруднювачі із використанням незначної кількості зразків і реагентів навіть якщо концентрація забруднювачів дуже низька [3].

Одним з перспективних напрямів є використання біосенсорів, що в основі мають вуглецеві нанотрубки (ВНТ), оскільки мають здатність легко з'єднуватися з різними молекулами, і мають добре ідентифіковані та оцінені характеристики електропередачі [4]. Вплив молекулярних модифікацій у ВНТ може бути використаний для відображення електричних характеристик, оскільки більшість атомів у ВНТ розташовані на поверхні [5]. Однією з переваг ВНТ є їх високий рівень чутливості завдяки великому відношенню площі поверхні до об'єму, пов'язаному з масивом місць зв'язування великої серії наночастинок і молекул [6, 7].

Активність, а також велике співвідношення площі поверхні до об'єму та висока ефективність сорбції є унікальними властивостями ВНТ, які роблять їх придатними для використання в очищенні стічних вод, а також як біосенсорів для виявлення мікробних забруднювачів, зокрема стійких до антибіотиків мікроорганізмів. у джерелах питної води [8]. Поверхнева кислотність ВНТ сприяє їх роботі як хорошого адсорбенту й сприятливого

детектора або датчика [9]. Деякі дослідники досліджували здатність ВНТ застосування як біосенсорів, оптимізувавши дві структури ВНТ як імуносенсори для визначення бактеріофага MS2 (вірусу, що існує в стічних водах). Легкість застосування біосенсорів підтверджується позитивними результатами цих досліджень із застосуванням двох методів виявлення [9, 10]. Наразі біосенсори можна застосовувати для швидкої ідентифікації вірусів і бактерій у водному середовищі (менш ніж за 1200 с).

Наступним кроком є модифікація ВНТ. Нанесення різних наноматеріалів на біосенсори може дозволити їм виявляти фармацевтичні препарати та бактеріальні забруднення у воді.

Графен як одношаровий двовимірний алотроп атомів вуглецю (двовимірне розміщення у вигляді стільників) є одним із наноматеріалів, які можуть покращити здатність біосенсорів завдяки його характерним нанокаркасам та іншим чудовим характеристикам. Це орієнтир для нових застосувань через його значне використання в наноконструкціях, наноелектроніці, оптоелектронних установках, системах електрохімічних суперконденсаторів і промислових польових транзисторах. Унікальні характеристики, включаючи спеціальні оптичні характеристики, високу електропровідність, велике відношення поверхні до об'єму, помітну щільність носія, велику рухливість носія та значну механічну міцність зробили графен популярною речовиною для використання в оптоелектронних системах, суперконденсаторах та інших датчиках [11]. Низька вартість графену, велике співвідношення площі поверхні до об'єму та однорідна структура зробили графен більш придатним для біосенсорів, ніж вуглецеві нанотрубки.

Іншим наноматеріалом на основі вуглецю є наночастинки сажі (нанопорошок), яка відома тим, що використовується у виробництві різних типів датчиків завдяки своїм унікальним властивостям, зокрема економічності, величезній площі поверхні, високій провідності та високій стабільності, а також здатності створювати плівки з однорідною структурою. Вуглецеві матеріали, які мають найбільш об'ємний каркас, виробляються шляхом спалювання вуглеводнів. Їхні композиції містять агрегацію або агломерацію сферичних частинок, у яких кожна частка має турбостратичну структуру випадкових шарів упаковки графіту.

Як правило, вуглецеві наноматеріали мають низьку провідність порівняно з металами, але вони пов'язані з металевою або напівпровідниковою (10^{-4} Ом см) поведінкою для досягнення високих швидкостей передачі електрона. Відомий досить цікавий інженерний варіант коли виготовили датчик із нанокулочок сажі і картопляного крохмалю, нанесених на скловугільний електрод, для виявлення тетрацикліну у водопровідній та річковій воді [12]. Результати показали відповідну чутливість цього датчика завдяки його підвищеній провідності та великій площі поверхні.

Іншим типом біосенсора є полімери з молекулярним відбитком (ПМВ). В роботі [13] описали ПМВ як штучні речовини з особливими порожнинами. Взаємодія між шаблонною молекулою та комплементарною функціональною мономерною групою може визначати ефективність сенсорів ПМВ [14]. Незважаючи на те, що межі виявлення іноді можуть становити менше половини дозволеної концентрації для елементів у воді, мінімальний зразок, необхідний для деяких біосенсорів МІР, часто становить 2,5 мл із часом експерименту 2 хвилини.

Отже, однією з переваг вуглецевих нанотрубок є їхній високий рівень чутливості завдяки великому відношенню площі поверхні до об'єму, пов'язаному з масивом місць зв'язування великої серії наночастинок і молекул. Чудові властивості графену, такі як особливі оптичні та електричні властивості, велика площа поверхні, велика мобільність носія та значна механічна міцність, зробили графен популярним датчиком для виявлення забруднення води фармацевтичними засобами.

Серед матеріалів на основі вуглецю технічний вуглець вважається найкращим датчиком через його низьку ціну, велику площу поверхні, хорошу провідність і високу стабільність.

Виробництво та комерційна доступність вуглецевих наноматеріалів за розумною ціною може бути легко досягнуто шляхом відносно простої переробки вуглецю, майже багатого хімічного елемента.

Використані інформаційні джерела:

1. *González-Martínez M. A., Puchades R., Maquieira A., Ferrer I., Marco M. P. and Barceló D. (1999). Reversible immunosensor for the automatic determination of atrazine. Selection of performance of three polyclonal antisera. Analytica Chimica Acta, 386, 201–210.*
2. *Onnerfjord P., Eremin S. A., Emneus J. and Marko-Varga G. (1998). Fluorescence polarization for immunoreagent characterisation. Journal of Immunological Methods, 213, 31–39*
3. *Samendra P. S., Masaaki K., Charles P. G. and Ian L. P. (2014). Rapid detection technologies for monitoring microorganisms in water. Biosensors Journal, 3, 109.*
4. *Ajayan P. M. (1999). Nanotubes from carbon. Chemical Reviews, 99, 1787–1800.*
5. *Yang W., Thordarson P., Gooding J. J., Ringer S. P. and Braet F. (2007). Carbon nanotubes for biological and biomedical applications. Nanotechnology, 18, 1–12.*
6. *Ali S. R., Ma Y., Parajuli R. R., Balogun Y., Lai W. Y.-C. and He H. (2007). A nonoxidative sensor based on a self-doped polyaniline/carbon nanotube composite for sensitive and selective detection of the neurotransmitter dopamine. Analytical Chemistry, 79, 2583–2587.*

7. An K. H., Jeong S. Y., Hwang H. R. and Lee Y. H. (2004). Enhanced sensitivity of a gas sensor incorporating single-walled carbon nanotube polypyrrole nanocomposites. *Advanced Materials*, 16, 1005–1009.
8. Ong Y., Thai A., Abdul L., Zein S. H. and Tan S. H. (2010). A review on carbon nanotubes in an environmental protection and green engineering perspective. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 27(2), 227–242.
9. Rao A. D., Dash S., Babu S. V. and Jain I. (2007). Numerical modeling of cyclone impact on the ocean- A case study of the Orissa Supper Cyclone. *Journal of Coastal Research*, 23(5), 1245.
10. Davis R., Irudayaraj J., Reuhs B. L. and Mauer L. J. (2010). Detection of *E. coli* O157:H7 from ground beef using Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Science*, 75, M340–M346.
11. Adegoke A. A., Singh G. and Stenstrom T. A. (2019). Biosensors for monitoring pharmaceutical nanocontaminants and drug resistant bacteria in surface water, subsurface water and wastewater effluent for reuse. *Nanoparticles in Pharmacotherapy*, 525–559, [https:// doi.org/10.1016/B978-0-12-816504-1.00014-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816504-1.00014-4).
12. Delgado K. P., Raymundo-Pereira P. A., Campos A. M., Oliveira O. N. and Janegitz B. C. (2018). Ultralow cost electrochemical sensor made of potato starch and carbon black nanoballs to detect tetracycline in waters and milk. *Electroanalysis*, 30, 2153–2159.
13. Bui B. T. S. and Haupt K. (2010). Molecularly imprinted polymers: synthetic receptors in bioanalysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 398(6), 2481–2492.
14. Whitcombe M. J., Chianella I., Larcombe L., Piletsky S. A., Noble J., Porter R. and Horgan A. (2011). The rational development of molecularly imprinted polymerbased sensors for protein detection. *Chemical Society Reviews*, 40(3), 1547–1571.