

УДК 621.38:502/504

НАНОФОТОННИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОРГАНІЧНИХ КАНЦЕРОГЕНІВ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

О. А. Сушко

Аспірантка*

Контактний тел.: (057)702-03-69

E-mail: olenkasushko@gmail.com

М. М. Рожицький

Доктор фізико-математичних наук, професор,
науковий керівник лабораторії

Лабораторія аналітичної оптохемотроніки

*Кафедра біомедичних електронних пристроїв та
системХарківський національний університет
радіоелектроніки

пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166

Контактний тел.: (057) 702-03-69

E-mail: rzh@kture.kharkov.ua

У статті розглянуто проблему визначення забруднення у водних середовищах, органічних канцерогенів, таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ). Викладено основні принципи побудови нанофотонного методу визначення органічних канцерогенів з використанням сучасних нанотехнологій та наноматеріалів

Ключові слова: канцероген, поліциклічні ароматичні вуглеводні, нанофотоніка

В статье рассмотрена проблема определения загрязнения в водных средах органических канцерогенов, таких как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Изложены основные принципы построения нанофотонного метода определения органических канцерогенов с использованием современных нанотехнологий

Ключевые слова: канцероген, полициклические ароматические углеводороды, нанофотоника

In article a problem is considered concerning the objects definition in water medium of organic carcinogens such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Basic principles of a novel nanophotonic method development for PAH definition are presented

Key words: carcinogen, polycyclic aromatic hydrocarbons, nanophotonics

1. Вступ

На сьогоднішній день чітко проявляється тенденція до погіршення якості поверхневих та підземних вод. Проблема забруднення води органічними канцерогенами не нова, тим більш, що «канцерогенність» води, яку споживає населення України, різко зростає з року в рік. До того ж, як показують дослідження, наявність канцерогенів характерно не лише для України, але й для ряду високорозвинених країн (Америка, Японія та ін.). Підвищення рівня забруднення навколишнього середовища, перш за все води, продуктів харчування, тощо хімічними органічними канцерогенами (ХОК) призводить до різкого зростання кількості онкологічних захворювань не лише в Україні, а й за її межами. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я щороку кількість онкохворих збільшується на 10 млн. чоловік [1]. Україна знаходиться на другому місці в Європі за темпами розповсюдження онкологічних захворювань. Ризик розвитку онкологічних захворювань складає 27,7 % для чоловіків та 18,5 % для жінок. Захворюваність на рак стабільно росте на 2,6–3% за рік, та онкозахворювання продовжують «молодіти» [2].

Серед найбільш поширених та небезпечних для здоров'я ХОК є клас речовин, що відносяться до полі-

циклічних ароматичних вуглеводнів, тому доцільно коротко розглянути їх основні фізико-хімічні властивості та вплив на організм людини.

2. Поліциклічні органічні вуглеводні, їх властивості та вплив на організм людини

Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) – група, що включає в себе близько 10 тис. різноманітних хімічних сполук, які складаються з конденсованих бензольних кілець. Деякі з них в значних кількостях знаходяться в навколишньому середовищі, їжі та особливо в воді. ПАВ, що в своєму складі мають більш ніж чотири бензольних кільця, називаються малолетучими. Ці ПАВ є більш стабільними та токсичними в порівнянні з летучими. ПАВ мають ліпофільну природу, не дивлячись на те, деякі з них можуть в значній мірі розчинятися в воді, примушує замислитися про якість води, яку ми споживаємо.

Всі відомі ПАВ попадають в навколишнє середовище шляхом неповного згоряння вуглецевмісних органічних матеріалів, таких як нафта, кам'яне вугілля, деревина, сміття та відходи хімічної промисловості. Максимальна кількість ПАВ утворюється при

згорянні чи термічній обробці органічних речовин при температурі в діапазоні 500–700°C, наприклад, лісові пожежі, металургійна промисловість, тощо.

В родині ПАВ налічують найбільшу групу канцерогенних речовин. Більшість ПАВ з тих, що не проявляють канцерогенної дії є синергістами в суміші з канцерогенними ПАВ, тобто підсилюють дію цих канцерогенів.

В більшості випадків канцерогенні ПАВ потрапляють в організм людини зі смаженою, або копченою їжею, неякісною водою та повітрям. Вплив на організм людини окремого ПАВ складно визначити, бо в більшості випадків

(в їжі, воді, повітрі) вони зустрічаються як комплекс сполук, до складу яких входить декілька представників цього класу.

Науковий комітет ЄС з питань продуктів харчування оцінював 33 представника ПАВ, з яких ідентифікував 15, що мають виражені генотоксичні та канцерогенні властивості [3]. В результаті досліджень їх канцерогенності увагу привернув бензо[а]пірен (БП), який міг би використовуватися як маркер, але БП складає близько 20% сумарної концентрації канцерогенних ПАВ. Тому Науковий комітет ЄС рекомендує паралельно з БП проводити моніторинг наступних ПАВ: бенз[а]антрацен, бензо[*j*]

флуорантен, бензо[*k*]флуорантен, бензо[*ghi*]перилен, хризен, циклопентан[*cd*]пірен, дібенз[*a,h*]антрацен, дібензо[*a,e*]пірен, дібензо[*a,h*]пірен, дібензо[*a,i*]пірен, дібензо[*a,l*]пірен, індено[*1,2,3-cd*]пірен та 5-метилхризен.

The Water Framework Directive (2000/60/EC) визначає стратегію, що запобігає забрудненню водних об'єктів навколишнього середовища в країнах ЄС, але ця директива потребувала оцінки та переліку пріоритетних забруднювачів. В наслідок чого, у *Рішенні 2455/2001/EC* було названо 33 представники ПАВ, які необхідно моніторингувати в поверхневих, підземних та прибережних водах. В п'ятірці найбільш небезпечних ПАВ, що найбільш привернули увагу ЄС, входять БП, бензо[*b*]

флуорантен, бензо[*k*]флуорантен, індено[*1,2,3-cd*]пірен та бензо[*ghi*]перилен.

Drinking Water Directive визначила гранично допустиму концентрацію (ПДК) для БП, яка становить 0,010 мг/л, та сумарної суміші п'яти вищезазначених ПАВ, що складає 0,1 мг/л.

В Україні 16.07.2010 року було оприлюднено Наказ Міністерства охорони здоров'я № 400 від 12.05.2010 р., яким затверджено нові Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-400-10). Згідно якого, маємо дані, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Санітарно-токсикологічні показники органічних компонентів питної води

Найменування показників	Одиниці виміру	Нормативи для питної води			Методики визначення
		водопровідної	з колодязів та каптажів джерел	фасованої, з пунктів розливу та бюветів	
Бензо[а]пірен	мг/дм ³	0,005	Не визначається	< 0,002	ДСТУ ISO 17993:2008. Якість води. Визначення ПАВ у воді методом високоефективної рідинної хроматографії з флуоресцентним детектуванням після рідинно-рідинного екстрагування
Пестициди (окремо)	мг/дм ³	0,0001		0,0001	РД 52.24.66-88. Методические указания по определению содержания галоген-оргоанических пестицидов и их метаболитов в поверхностных водах
Пестициди (сума)	мг/дм ³	0,0005		0,0005	
Тригалогенметани (сума)	мг/дм ³	100		10 ²	ДСТУ ISO 10301-2004. Якість води. Визначення високолетких галогенованих вуглеводнів методом газової хроматографії Методичні вказівки № 0052-98 Газохроматографічне визначення тригалогенметанів (хлороформу) у воді, затв. від 01.02.99 № 2
Дибромхлорметан	мг/дм ³	10	1		

Як видно з таблиці, в Україні згідно новим нормам та правилам в питній воді санітарно-токсикологічному визначенню підлягає лише БП, тобто один представник канцерогенних ПАВ.

Не зважаючи на всі вищенаведені норми та застереження, в світі щорічно в навколишнє середовище потрапляє близько 7 тис. т. БП – речовина вкрай стійка, якій властива дуже висока здібність до акумуляції в організмі та навколишньому середовищі.

БП (C₂₀H₁₂) – онкогенна речовина, саме його онкологи вважають винним в ураженні організму багатьма видами раку: порожнини рота, гортані, горла, сечового міхура, органів шлунково-кишкового тракту і легенів і т.д. З організму БП частково виводиться в

незміненому вигляді, а частково окислюється, даючи похідні фенольного і хінонного типу. Деяким з цих продуктів також властива мутагенна активність, і тому ПАВ - типові екотоксини. В організмі деяка частина БП перетворюється на небезпечну сполуку бензпирендіол-епоксид, відбувається мутація гена р53, що відповідає за організацію захисту людського організму від раку. У нормальному стані цей ген пригнічує ріст пухлини, видаляючи хворі клітини.

Для визначення ПАВ існують низка відомих методів, що розглянуто нижче.

3. Методи визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів в водних об'єктах навколишнього середовища

Існує ряд традиційних методів для визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів, серед яких є хроматографічні, імуно-хімічні, біологічний та хімічний методи (табл. 2).

Наведені методи мають ряд спільних недоліків, таких, як значна складність та вартість обладнання, тривалість процесів пробопідготовки та аналізу, висока межа визначення аналіту в досліджуваному зразку, низька селективність.

Згідно з ДСанПіН 2.2.4-400-10 основним методом для детектування ПАВ, в даному випадку БП, є метод високоефективної рідинної хроматографії з флуоресцентним детектуванням після рідинно-рідинного екстрагування [4]. Але, як видно з табл. 2, його голов-

ними недоліками є складність, громіздкість обладнання, трудоемність та тривалість аналізу, що ускладнює автоматизацію, портативність, використання методу для моніторингу, а також метод є економічно неефективним, із-за дорожнечі хроматографічної установки та реактивів, яких необхідна значна кількість для проведення аналізу.

Судячи з усього вищезазначеного, на сьогодні актуальною та відкритою проблемою залишається розробка новітніх ефективних методів та засобів для визначення органічних канцерогенів в воді, які дозволили б визначати наявність останніх у воді в слідових концентраціях з високою селективністю та експресністю. Цим вимогам відповідає новітній метод визначення органічних канцерогенів на базі принципів нанофотоніки та нанотехнологій.

4. Нанофотоніка, наноматеріали та метод визначення органічних канцерогенів в водному середовищі на основі нанофотонного сенсора

Запропонований нанофотонний метод визначення органічних канцерогенів у водних середовищах використовує сучасні нанотехнології і наноматеріали – квантово-розмірні структури з поєднанням гарно зарекомендованого аналітичного методу – електрохемілюмінесцентного (ЕХЛ) аналізу.

Нанофотоніка – це сучасний розділ оптики, що розглядає взаємодію світла з речовиною на наномасштабному рівні та пропонує вирішення низки проблем,

Таблиця 2

Методи визначення ПАВ у водному середовищі

Назва методу	Принцип методу	Обладнання	Реагенти	Межа визначення	Тривалість	Недоліки методу
Високоефективна рідинна хроматографія	Розділення компонентів у суміші, засноване на різниці в рівноважному розділенні їх між двома не змішуваними фазами, одна з яких нерухома, а інша – рухома	Хроматограф, хроматографічна колонка	Елюент, сорбент	0,2 нг/мл	~ 3 год.	Складність, дорожняча обладнання, трудоемність
Імуно-хімічний аналіз	Імунохімічна реакція між антитілом та антигеном, що протікає з виникненням імунного комплексу антиген-антитіло. Детектування проводиться введенням мітки в один з вихідних компонентів реакційної системи.	Імуноферментний аналізатор	Антитіла, антиген	0,9 нг/мл	~ 3 год.	Трудоемність, тривалість пробопідготовки та аналізу, невисока чутливість
Біологічні тест-методи	Заснованим на відповідній реакції живих організмів, здатних давати достовірну інформацію про якість компонентів оточуючого середовища та негативну дію забруднюючих речовин.	Детектор	Біотест (культура біологічних організмів), аналіт в водному середовищі	70 нг/мл	3÷30 діб	Висока тривалість, висока МВ, низькі чутливість та низька селективність
Індикаторні тестові смужки	Реакція з хромогенними реагентами		Індикаторні тест-смужки	0,2 мг/мл	10÷20 хв.	Висока МВ, низькі чутливість та селективність

в тому числі побудови нанорозмірних пристроїв для використання в наноаналітиці (рис. 1).

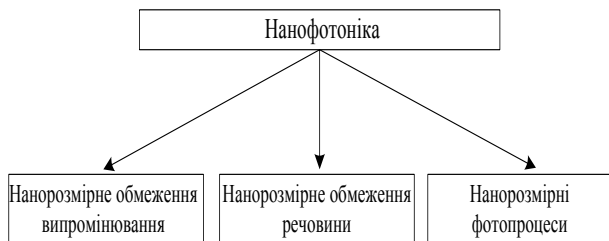


Рис. 1. Сутність нанопотоніки як науки та технології

У представленому методі найбільш цікаве для застосування в аналітиці нанорозмірне обмеження речовини.

При зменшенні об'єму будь-якої речовини з однієї, двох чи трьох координат до розмірів нанометрового масштабу з'являються якості, які не були властиві даній речовині на макрорівні (табл. 3). Такі речовини відносять до наноматеріалів, а технологію їх отримання – до нанотехнологій.

Таблиця 3

Розмірна залежність фізичних властивостей наноматеріалів

Властивості	Відповідь матеріалу на зменшення розміру структурного елемента
Фазові перетворення	Зниження температури фазових перетворень, в тому числі температури плавлення
Кінетичні	Аномально високі значення коефіцієнтів дифузії, підвищення теплоємності, зниження теплопровідності
Електричні	Підвищення або зниження електроопору, діелектричної проникливості
Магнітні	Збільшення коерцитивної сили, магнітоопору, поява супермагнетизма
Механічні	Збільшення межі текучості, твердості, зносостійкості, прояв надпластичності при високій температурі

Найбільш відомими об'єктами нанопотоніки є квантово-розмірні структури, таких як напівпровідникові квантові точки та нанотрубки.

Напівпровідникова квантова точка (КТ) – фрагмент напівпровідника, обмежений за трьома просторовими вимірами та містить електрони провідності. Точка повинна бути настільки малою, щоб могли проявитися суттєві квантові ефекти, що досягається, коли кінетична енергія електрона $\frac{\hbar^2}{2md^2}$, де d – харак-

терний розмір точки, m – ефективна маса електрона на точці.

Відомі напівпровідникові КТ трьох типів: КТ з структурою ядро; КТ з структурою ядро–оболонка; КТ з структурою ядро–оболонка + полімерне покриття (рис. 2).

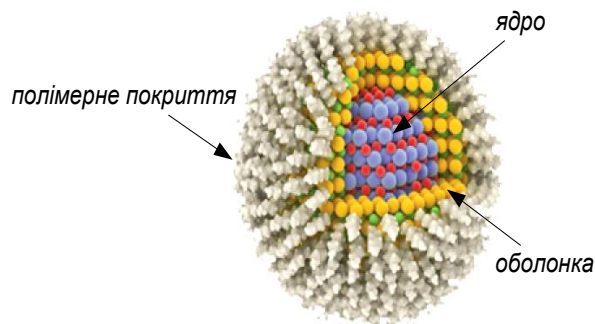


Рис. 2. Структура КТ типу ядро–оболонка + полімерне покриття

Властивості КТ представлені на рис. 3. КТ є люмінофорами, але в порівнянні з органічними люмінофорами мають значно вужчий спектр випромінювання, високу інтенсивність люмінесценції, високий квантовий вихід та тривалий час життя люмінесценції. Це вигідно вирізняє КТ від відомих люмінофорів і є важливим для їх застосувань, у тому числі у біомедицині.

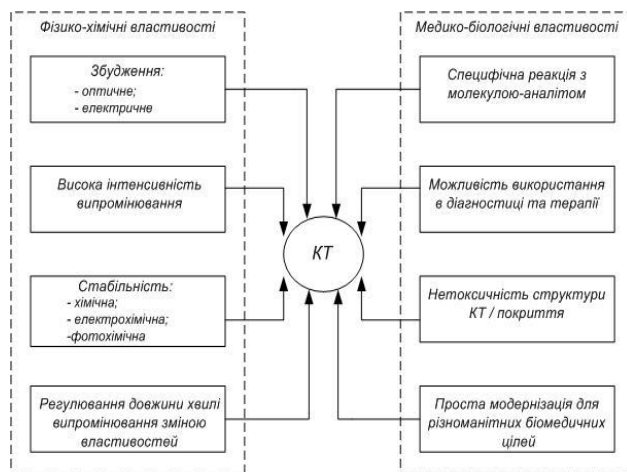


Рис. 3. Фізико-хімічні та медико-біологічні властивості КТ

Зі зменшенням ядра КТ, спектри поглинання та випромінювання зміщуються гіпсохромно. Таким чином, можна переналаштувати довжину хвилі випромінювання та створювати нанопотонні прилади з різними довжинами хвиль випромінювання.

При зменшенні розміру наночастки відношення числа поверхневих атомів до числа атомів, що знаходяться в об'ємі КТ, стає більше. В процесі збудження на неоднорідностях топології поверхні можуть виникнути центри захопту електронів та дірок, так названі пастки.

Наявність поверхневих станів (пасток) приводить до зменшення квантового виходу люмінесценції, деструкції наночасток тощо. Поверхневі пастки представляють собою вільні зв'язки, здатні захоплювати носії заряду. Для уникнення небажаного впливу поверхневих пасток на КТ наносять напівпровідникову оболонку з більшою забороненою зоною, ніж у ядра (рис. 4).

Якщо використовується лише ядро, то необхідно провести пасивацію поверхні КТ спеціальним покриттям. Відсутність стабілізуючого покриття призводить до агрегації КТ, тим самим створюється прототип об'ємного матеріалу. Для проведення електрохімічних та електрохемілюмінесцентних досліджень та створення відповідних нанофотонних сенсорних елементів необхідно отримання не конгломерату, а окремо сформованих КТ.

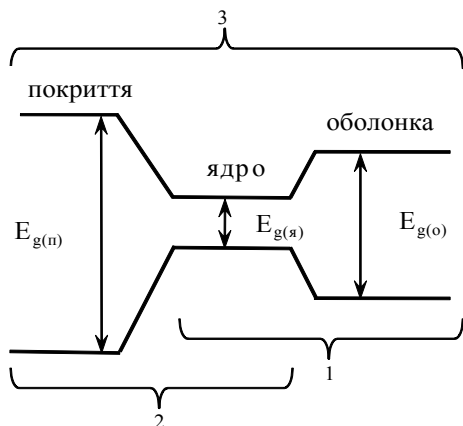


Рис. 4. Енергетична схема квантової точки: 1 – напівпровідникове ядро/напівпровідникова оболонка ($E_{g(a)} \ll E_{g(o)}$); ядро/органічне покриття ($E_{g(a)} \ll E_{g(n)}$); 3 – ядро/оболонка/покриття

Люмінесценція КТ дає інформацію про внутрішню структуру частки, тоді як за допомогою ЕХЛ можна досліджувати її поверхню. Це зв'язано з тим, що в процесах електрохімічного збудження КТ приймають участь саме поверхневі стани.

Ще одним дуже цікавим різновидом наноматеріалів є вуглецеві нанотрубки (ВНТ). Вони представляють продовговаті структури у вигляді порожнього циліндра, що складається з одного, або декількох, згорнутих в трубку графітових шарів з гексальною організацією графітових площин, і закінчуються зазвичай напівсферичною голівкою. Діаметр ВНТ складає від одного до декількох десятків нанометрів, а довжина – десятки мікрон.

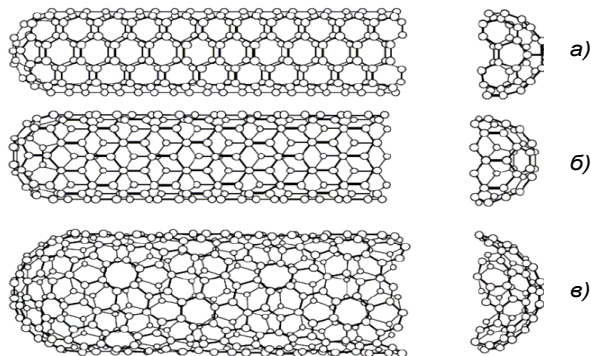


Рис. 5. Структури нанотрубок в залежності від способу скручування графітового листа: а) кресельна; б) зигзаго-видна; в) хіральна

Кут орієнтації графітової площини відносно вісі нанотрубки, в свою чергу, задає хіральність нанотрубки, яка визначає, зокрема, її електричні характеристики. [5] Нанотрубки як окреслені одновимірні матеріали – ідеальні об'єкти для вивчення електронних властивостей та їх зв'язку з атомною структурою.

У реальних пристроях НТ здатні виявляти властивість з'єднуватися з макрооб'єктами, тому необхідно досліджувати електротранспортні властивості окремих НТ. Загалом одностінні нанотрубки можна вважати металевими, якщо за кімнатної температури їхня електрична провідність збільшується залежно від опорної напруги, прикладеної до електрода, віддаленого від НТ на сотні нанометрів. Роль опорної напруги полягає у зміні електростатичного потенціалу або рівня Фермі нанотрубки. Для металевої трубки зміщення енергії Фермі істотно не змінює густини станів поблизу поверхні, тому значних змін провідності не спостерігається. Особливі випадки можуть виявлятися тоді, коли металева одностінна вуглецева НТ поводить як балістичний провідник. Для металевих НТ рівень Фермі має два енергетичні підрівні, через це транспорт відбуватиметься двома каналами і тоді матимемо чотири електронні стани. За відсутності електронного розсіювання й ідеального електронного контакту з НТ опір системи R виражатиме співвідношення

$$\frac{h}{2e^2} = R,$$

де h – стала Планка; e – заряд електрона.

Кожен канал робитиме свій внесок в електропровідність системи. Для прикладу, опір в металевій нанотрубці дорівнює 6,45 кОм [6].

Вимірюванням електричного опору виявлено, що нанотрубки поведуться як квантові провідники. Квантові явища, які спостерігаються в цьому разі, включають одноелектронне зарядження і резонансне тунелювання через дискретні енергетичні стани НТ. Це впливає з квантових обмежень вздовж нанотрубки [7]. Заряд, зумовлений одним електроном, або кулонівська блокада, виявляється тоді, коли мала металева точка-нанотрубка з'єднана з двома електродами [8]. Коли з'єднання слабке, то опір контакту буде більшим за R . Оскільки квантові точки досить малі, то ємність C теж мала й енергія, необхідна для віддачі електронній системі – e^2/C , більша за термічну енергію $k_B T$. Ємність у масштабі розміру нанотрубки змінюється лінійно відносно оберненої відстані. Для мікронної НТ енергія заряду одного електрона значно вища за кулонівську блокаду, її можна спостерігати лише за температури рідкого гелію (4,2 К). У режимі кулонівської блокади перенесення відбувається одним окремим електроном. Дискретні енергетичні рівні, які існують у нанотрубці певної довжини, добре описуються фізичною моделлю «частинка в потенціальній ямі», ширина якої дорівнює довжині нанотрубки. Коли дискретні енергетичні стани знаходяться на рівні Фермі системи, то спостерігається резонансне тунелювання. Відносно велика кулонівська енергія заряду у разі розміщення енергетичних рівнів на субмікронному масштабі довжини нанотрубки є характерною для малих систем.

Поліпшити електричні властивості нанотрубок можна їх допуванням електроакцепторними (I_2, Br_2) або електронодонорними (K, Cs) агентами. На-

приклад, допування калієм відбувається за кімнатної температури. Коли атоми калію адсорбуються на зовнішньому боці одностінної вуглецевої нанотрубки і постачають електрони всередину трубки, то відбувається перехід від *p*- до *n*-типу провідності, тобто від діркового до електронного [9].

ВНТ також дуже чутливі до адсорбції молекул із газової фази, при чому значно змінюється їх електропровідність. Наприклад, якщо одностінна вуглецева нанотрубка експонує 200 пікопромиле NO₂, то електропровідність її зростає на три порядки. Цей факт покладемо в основу виготовлення хімічного сенсора [10].

Виходячи з аналізу літератури у галузі сенсорики та нанофотоніки можна запропонувати наступний підхід до створення нанофотонного методу (рис. 6), здатного до визначення органічних канцерогенів типу ПАВ.

Для визначення селективності методу, необхідно розглянути співвідношення енергій граничних молекулярних орбіталей квантово-розмірних детекторів (КТ) та визначаємих часток аналітів. Донор (КТ) з більшою (або приблизно рівною) енергією вищої заповненої молекулярної орбіталі (НОМО) ніж у відповідній орбіталі аналіта буде віддавати електрони легше і тим самим буде більш реакційноздатним. Аналіт (ПАВ) з нижчою незаповненою молекулярною орбіталлю (LUMO) повинен приймати електрони легше і також повинен бути реакційноздатним [11].

Якщо ми маємо суміш, яка складається з молекул аналітів (ПАВ), вибір наночасток буде базуватися на наступному принципі рис. 6

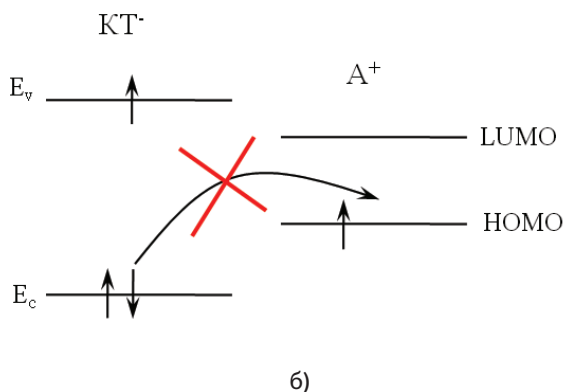
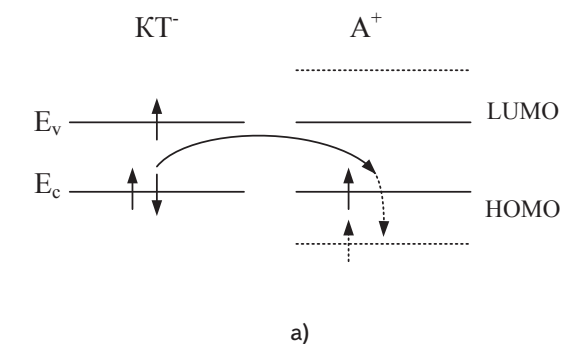
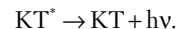
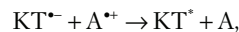
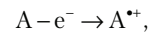
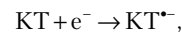


Рис. 6. Схематичне зображення реакції переносу електрону між часткою КТ та аналітом (а), неможливий варіант реакції (б)

Використовуючи рівняння відповідних реакцій процес, що відбувається в сенсорному пристрої, можна описати наступним чином



Тунелювання електрона між іонними формами реагуючих речовин буде проходити в тому випадку, якщо ширина забороненої зони КТ буде рівною, або меншою за різницю між граничними орбіталями молекули аналіту.

КТ, що переводяться у іонні форми при відповідних електрохімічних процесах, реагують з протилежно зарядженими формами аналіту, внаслідок чого випромінюється аналітичний сигнал – квант $h\nu$ (рис. 7). Число квантів, випромінених за визначений час, є мірою вмісту аналіту, тобто

$$I_{\text{ЕХЛ}} = f(c_a),$$

де $I_{\text{ЕХЛ}}$ - інтенсивність випромінювання;
 c_a - концентрація аналіту в зразку;
 що і характеризує сутність нанофотонного методу детектування [11].

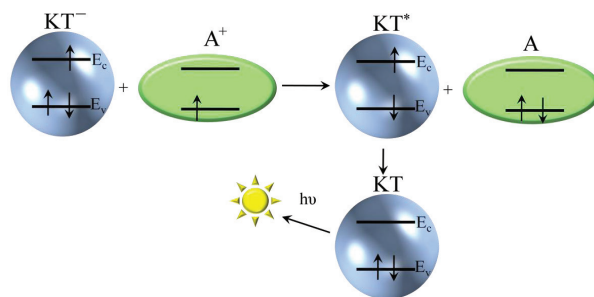


Рис. 7. Схема процесу нанофотонного визначення молекули аналіту – поліциклічних ароматичних вуглеводнів

Підвищити селективність запропонованого методу, можна за рахунок наступних методів:

- хімічного методу, який полягає в розділенні часток дослідного зразка за допомогою методу електрофорезу чи гел'єфільтрації;
- механічного методу, який передбачає фільтрацію, використання високоякісних систем для розділення компонентів зразка по розмірам;
- фізичного методу, який базується на підборі специфічної КТ під молекулу-аналіт, змінюючи параметри КТ;
- електрохімічного методу, що полягає в використанні вольтамперметрії при проведенні аналізу.

У даному методі, як зазначалося раніше, КТ застосовуються як світловипромінюючі детекторні елементи на речовини, що підлягають визначенню. Принцип методу можна проілюструвати наступним рис. 8.



Рис. 8. Алгоритм нанофотонного методу детектування поліциклічних ароматичних вуглеводнів

Оптимальні умови для реалізації нанофотонного методу аналізу включають в себе:

- дані, що характеризують аналіт (фізико-хімічні, спектральні та енергетичні);
- відповідні аналіту дані по детекторним елементам (КТ), тобто матеріал, покриття (оболонка), розмір (радіус) і т.д.;

- знаходження стехіометрії процесу.

Висновок

Таким чином, з усього вищесказаного можна зробити висновок щодо можливості використання запропонованого нанофотонного методу визначення органічних канцерогенів для виконання аналітичних завдань. Даний метод є високочутливим, селективним, експресним, економічно та технологічно вигідним, тому є перспективним для подальших розробок. Метод може бути реалізованим за допомогою відповідного нанофотонного сенсору, розробка якого буде становити подальші етапи нашої роботи.

Робота виконана в рамках міжнародних проектів УНТЦ № 4495 та № 5067 (керівник проектів д.ф.-м.н., проф. Рожицький М.М.)

Література

1. Статистика рака в Україні // Бюлетень Національного канцер-реєстру № 10 – Рак в Україні. – 2008–2009
2. World Health Organisation (WHO) / J. Kielhorn, A. Bouchuе // Geneva –1998 123 – 152 p.
3. European Union Decision 2455/2001/EC of the European Parliament and of the Council // Off. J.Eur.Comm.L331. – 2001.
4. Wenzl T., Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union [Текст] / T. Wenzl, R. Simon, J. Kleiner, E. Anklam // Trends in Analytical Chemistry – 2006. – Vol. 25, No. 7. – С. 716–725.
5. Елецкий А.В., Углеродные нанотрубки [Текст] / А. В. Елецкий // УФН – 1997. - Т. 167, № 9. - с. 954
6. Burghard M., Electronic and vibrational properties of chemically modified single-wall carbon nanotubes / M. Burghard // Surface Sci. Rep. – 2005. – 58, N ¼. – P.1 – 109.
7. Odom T.W., Structure and electronic properties of carbon nanotubes [Текст] / T.W Odom, J.-L. Huang, P. Kim, C.M. Lieber // J.Phys.Chem.B. – 2000.– P. 2794–2809.
8. White C.T., Carbon nanotubes as long ballistic conductors [Текст] / C.T. White, T.N. Todorov // Nature. – p. 240.
9. Нанохімія наносистеми наноматеріали: наук. видання [Текст] / С.В. Волков, Є.П. Ковальчук, В.М. Огенко, О.В. Решетняк. – К. : Наук. думка, 2008. – с.109.
10. Bockrath M., Chemical doping of individual semiconducting carbon-nanotube ropes [Текст] / M. Bockrath, J. Hone, A. Zettl // Phys. Rev. B. – 2000. – P. R10606 – R10608.
11. Галайченко Е.Н., К возможности использования квантовых точек в качестве детекторных элементов нанотехнологических оптических сенсоров [Текст] / Е.Н. Галайченко, Н.Н. Рожицкий // Радиотехника.–2008.–№153.–С. 90–95.