



ХІМІЯ

УДК 681.586

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.9>

РОЗРОБЛЕННЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОРГАНІЧНИХ АМІНІВ НА ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ

О. І. Аксіментьєва¹, Ю. Б. Марків², О. І. Конопельник³, Н. Ю. Журіна⁴

Хімічні та біологічні забруднювальні речовини здатні до газовиділення, тому детектування таких газів укр. необхідне для швидкого виявлення прихованих шкідливих речовин або їхніх компонентів. Органічні аміни становлять загрозу для людей і навколишнього середовища, тому створення спеціальних газових сенсорів є необхідним для швидкого виявлення цих речовин. Перспективними матеріалами таких сенсорів є електропровідні спряжені полімери, зокрема поліанілін та його похідні.

Вивчено особливості оптичного поглинання плівок поліаніліну під дією аміаку й органічних амінів. Для отримання зразків використовували метод хімічної полімеризації аніліну у водному розчині сульфатної кислоти під дією еквімолярної кількості персульфату амонію.

Проаналізовано ІЧ-спектри та спектри оптичного поглинання поліаніліну, встановлено основні характеристичні смуги для плівкового зразка. Плівки протестовано на чутливість до випарів аміаку, диетилентриаміну (ДЕТА) та поліетиленполіаміну (ПЕПА). За дії аміаку впродовж 1–3 хвилин в оптичних спектрах відбувається значний зсув смуги з максимумом за $\lambda = 820$ нм і формується нова смуга з максимумом за $\lambda = 590$ нм.

За дії парів ДЕТА та ПЕПА спостерігається зменшення оптичної густини смуги в діапазоні довжин хвиль 700–1 000 нм, а в області 500–650 нм зростає оптичне поглинання, що може бути пов'язане зі збільшенням концентрації аміно-хіноїдних фрагментів. Проте під дією ПЕПА зміна

¹ доктор хімічних наук, професор,
головний науковий співробітник кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: aksimen@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3836-9607

² магістр, інженер кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: markivula@gmail.com
ORCID: 0009-0005-1618-5390

³ кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри загальної фізики
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: konopel@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4514-7340

⁴ студентка кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: natalyazh99@gmail.com
ORCID: 0009-0006-1722-0749

оптичної густини смуги за 820 нм виявляється більш помітно, ніж за дії ДЕТА, а також формується смуга з максимумом за 610 нм.

Встановлено, що чутливість плівки ПАН до дії газів є максимальною за довжини хвилі 600 нм. Швидкодія зразків за дії аміаку є найбільшою за $\lambda = 600$ нм, а за дії органічних амінів – за 820 нм. Отримані результати стануть основою для розроблення чутливих елементів оптичних сенсорів для виявлення токсичних амінів на забруднених територіях, у виробничих приміщеннях хімічних підприємств, складів тощо.

Ключові слова: оптичні спектри, поліанілін, аміак, диетилентриамін, поліетиленполіамін.

DEVELOPMENT OF SENSITIVE ELEMENTS OF OPTICAL SENSORS FOR THE DETECTION OF ORGANIC AMINES IN CONTAMINATED AREAS

O. I. Aksimentyeva, Yu. B. Markiv, O. I. Konopelnyk, N. Yu. Zhurina

Chemical and biological pollutants are present in the presence of gases, so the detection of such gases is necessary for the rapid detection of the presence of pollutants or their components. Organic amines pose a threat to humans and the environment, so the creation of toxic gas sensors is necessary for the rapid detection of these substances. Promising materials for such sensors are conductive conjugated polymers, include polyaniline and their derivatives.

The features of the optical absorption of a polyaniline film under the action of ammonia and organic amines were studied. To obtain samples, the method of chemical polymerization of aniline in an aqueous solution of sulfuric acid under the action of an equimolar amount of ammonium persulfate was used.

The IR spectrum and optical absorption spectrum of polyaniline were analyzed, and the main characteristic bands of the obtained sample were established. The films were tested for ammonia, diethylenetriamine (DETA), and polyethylenepolyamine (PEPA) vapors. With exposure to ammonia, a significant shift of the band with a peak at $\lambda = 820$ nm occurs and a new band with a maximum at $\lambda = 590$ nm is formed.

Under the action of DETA and PEPA vapors, a decrease in the optical density of the band is observed in the wavelength range of 700–1 000 nm, and in the region of 500–650 nm, optical absorption increases, which may be associated with an increase in the concentration of amino-quinoid fragments. However, under the action of PEPA, the change in the optical density of the band at 820 nm is more noticeable than under DETA, and a band with a maximum at 610 nm is also formed.

It was established that the sensitivity of the PAn film to the action of gases is maximum at a wavelength of 600 nm. The reaction rate of samples on ammonia is the highest at $\lambda = 600$ nm, and under the action of organic amines – at 820 nm.

The results obtained will become the basis for the development of sensitive elements of optical sensors for the detection of toxic amines in contaminated areas, in production facilities of chemical enterprises, warehouses, etc.

Key words: optical sensor, polyaniline, ammonia, diethylenetriamine, polyethylenepolyamine.

Вступ

Органічні аміни широко використовують у промисловості як хімікати для нафтопромислів, добавки для модифікації асфальту, епоксидні затверджувачі й інше (Hudson, 2021). Проте ці речовини є дуже токсичними та вибухонебезпечними; вдихання, проковтування або контакт шкіри з матеріалом можуть спричинити серйозні травми. В умовах воєнних дій і після їх завершення значна частина територій України залишиться забрудненою шкідливими речовинами – залишками отруйних речовин, токсичними вклученнями, що утворюються у процесах розкладу хімічних і органічних (біологічних) матеріалів. Особливу небезпеку становлять продукти горіння цих речо-

вин, оскільки за нагрівання утворюються подразнюючі газу. Також стік від пожежогасіння може бути токсичним і спричинити забруднення навколишнього середовища (National ..., 2025). Щоб захистити здоров'я людей і довкілля, необхідно розробити чутливі елементи оптичних сенсорів для моніторингу органічних амінів, що дозволить вчасно виявити ці речовини й уникнути займання.

Існує багато різних типів сенсорів, а саме – механічні, електромагнітні, теплові, оптичні, хімічні, електрохімічні тощо. Виходячи з огляду існуючих сенсорних матеріалів і пристроїв, найперспективнішими натеper вважаються напівпровідникові тонкоплівкові сенсори на основі

ZnO, SnO₂, TiO₂ та інших оксидів. Однак застосування оксидних матеріалів у сенсорах можливе тільки за високих робочих температур (473–1 073 K), що потребує спеціальних систем підігріву. Водночас поріг чутливості цих сенсорів не дозволяє визначати дуже малі концентрації газів, що виділяються з токсичних речовин у процесі їх зберігання та переробки (аміак, етанол, сірководень, кисень, оксиди нітрогену й інші). На відміну від оксидних сенсорів, органічні напівпровідникові елементи не потребують високих робочих температур, тому простіші за конструкцією, а півки органічних напівпровідників і полімерів можуть бути сформовані з використанням значно простіших і недорогих методів. Проте систематичних досліджень можливості використання цих матеріалів для контролю газових середовищ для виявлення шкідливих речовин на забруднених територіях на тепер не проведено. Зокрема, мало даних про закономірності зміни структури, електропровідності й оптичних властивостей органічних напівпровідників під дією полярних газів, відсутні прості та надійні засоби візуального експрес-контролю свіжості продуктів харчування. Тому розроблення чутливих елементів газових сенсорів на основі органічних напівпровідників (молекулярних кристалів і спряжених полімерів) шляхом вивчення їхньої структури, електричних, оптичних властивостей у газових середовищах різного типу є важливим і актуальним науковим і практичним завданням.

На сучасному етапі дослідники в пошуках сенсорів із кращою чутливістю, вибірковістю та швидшим часом відгуку, які легше створювати, які більш портативні, з можливістю дистанційного керування та, в ідеалі, менш дорогі (Wang, 2010). У цьому аспекті оптичні сенсорні мають кілька переваг, вони не потребують зовнішнього електричного сигналу, менш чутливі до електромагнітних перешкод, а їх відгук можна передавати на великі відстані за допомогою оптоволоконних систем. Основним елементом таких датчиків є чутливий матеріал, від якого залежить результат дослідження. Новітніми, перспективними сенсорними матеріалами вважаються електропровідні спряжені полімери, за відкриття яких у 2000 р. була присуджена Нобелівська премія з хімії (Heeger, 2001; MacDiarmid, 2001).

Електропровідні полімери – це новий клас речовин зі спряженою системою п-електронних зв'язків. Прості методи син-

тезу та легування дозволяють суттєво змінювати їхню провідність і ширину забороненої зони, яка для більшості полімерних напівпровідників лежить у межах 1,5–3,2 eV.

Дослідження в галузі електропровідних спряжених полімерів швидко розвиваються та демонструють великий потенціал у хімічних сенсорах газів за кімнатної температури (Tirfie et al., 2023). Загалом, електропровідні полімери з типовими п-спряженими структурами мають провідність р-типу. Під час взаємодії з молекулами газу вони поведуться або як донори, або як акцептори електронів, що може призвести до збільшення або зменшення концентрації носіїв. До спряжених полімерів, які досліджуються як чутливі матеріали, в основному належать поліанілін (далі – ПАН), поліпірол, полі(3,4-етилендіокситіофен) та їх похідні (Yan et al., 2020). У даній роботі досліджувалися сенсорні властивості півок ПАН щодо дії органічних амінів, а саме диетилентриаміну (далі – ДЕТА) та поліетиленполіаміну (далі – ПЕПА).

Поліанілін є перспективним сенсорним матеріалом для виявлення аміаку (Fagea et al., 2021), проте вплив на нього органічних амінів є не досить вивченим. Оскільки органічні аміни є похідними аміаку, то ми припускаємо, що їхня дія на полімер має схожі механізми взаємодії, що дозволяє розглядати ПАН як ефективний матеріал для виявлення аміновмісних речовин.

Методи отримання сенсорних півок спряжених полімерів досить різноманітні та включають електрохімічну полімеризацію, вакуумне напилення, техніку Ленгмюра – Блоджет та інші (Tsizh & Aksimentyeva, 2020). Проте ці методи потребують складного апаратурного оформлення і в деяких випадках є енерговитратними. Значно спростити технологію отримання зразків дозволяє метод хімічного осадження, за якого сенсорна півка формується безпосередньо на прозорому субстраті у процесі полімеризації *in situ* без дії зовнішніх чинників.

Метою роботи стало встановлення закономірностей оптичного поглинання тонких шарів ПАН, отриманих окисною полімеризацією на поверхні скла, під дією аміновмісних речовин – аміаку й органічних амінів.

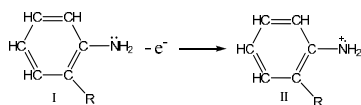
Матеріал і методи

Зразки ПАН отримували в тонкому шарі на оптично прозорих електропровідних субстратах за допомогою методу хімічної окисної полімеризації. Синтез ПАН в тонкому шарі проводили з 0,1 М розчину

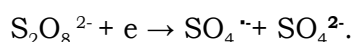
мономеру в 0,5 М сірчаній кислоті за температури $T = 293$ К. Як окисник використовували еквімолярний розчин персульфату амонію. Як субстрати використано скляні пластинки, вкриті з одного боку провідним шаром SnO_2 . Після нанесення плівок протягом 6–10 хвилин зразки промивали дистильованою водою та сушили у вакуумній шафі до постійної маси за температури 360–380 К. Отримували рівномірні покриття зеленого кольору з міцною адгезією до поверхні електрода (рис. 1-а).

У процесі формування сенсорних плівок методом хімічного осадження ПАН із розчинів мономеру у протонних кислотах відбувається низка фізико-хімічних процесів, пов'язаних із перенесенням електрона на межі електрод – розчин, окисненням мономеру з формуванням катіон-радикалів аніліну, хіноїдна ізомеризація і окисне сполучення яких приводять до утворення спряжених полімерних ланцюгів і формування електропровідного полімерного шару (Аксиментьєва, 1998).

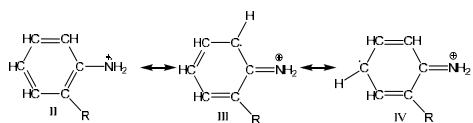
На першому етапі відбувається окиснення мономеру з відривом одного електрона (схема). Процес ініціюється реакцією окиснення мономеру до катіон-радикала:



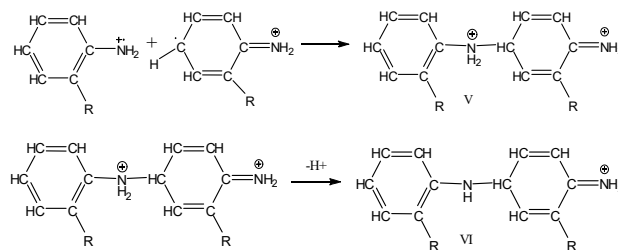
Окисник – $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ водночас відновлюється до аніон-радикала $\text{SO}_4^{\cdot-}$:



Згідно з наявними теоріями, катіон-радикали ізомеризуються і перебувають у формі резонансних структур II–IV:



Найбільш стабільною є структура IV, особливо за наявності електрон-донорного замісника (R).



Оскільки катіон-радикал існує переважно як структура IV, то полімеризація відбувається здебільшого в парах – положення і приєднання (окисне сполучення) вихідного й ізомеризованого катіон-радикалів відбувається за принципом «голова – хвіст», що призводить до утворення димеру, супроводжується депротонуванням. Надалі відбуваються послідовні процеси окиснення димеру й окисного сполучення з мономером, що зумовлюють ріст полімерного ланцюга.

Процес окиснення аніліну в розчині кислоти починається після індукційного періоду, який залежить від температури й концентрації мономеру, супроводжується зміною кольору реакційної суміші, яка з безбарвної стає світло-синьою, а потім – темно-синьою, за тривалого часу полімеризації – темно-зеленою або чорною.

Утворення полімеру є бімолекулярною реакцією, ускладненою гетерогенними умовами росту ланцюга, коли продукт реакції, утворений у приелектродному шарі, не розчиняється в реакційному середовищі й утворює плівку на поверхні електрода. Утворений полімерний шар має яскраво-зелене забарвлення, властиве кислотно-легованій формі ПАН – солі емеральдину (див. рис. 1-а).

Для вивчення сенсорних властивостей отриманої плівки як аналіти досліджували випари амінів: аміаку, ДЕТА та ПЕПА.

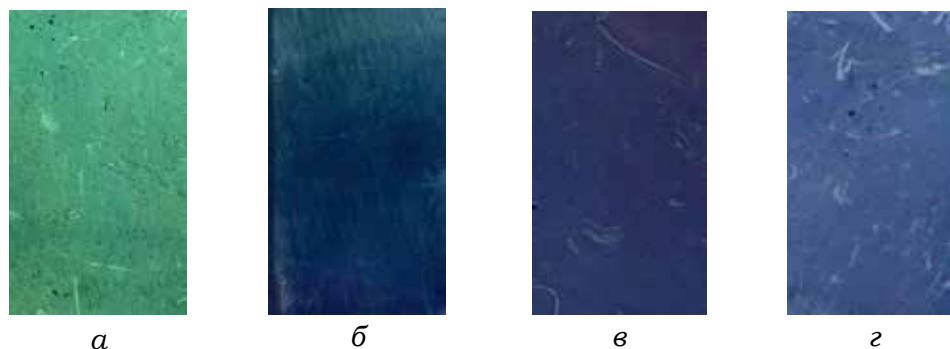


Рис. 1. Світлини поверхні плівки: а – ПАН; б – ПАН під дією NH_3 ; в – ПАН під дією ДЕТА; г – ПАН під дією ПЕПА (збільшення 150)

Структурні формули речовин наведені на рис. 2.

За допомогою ІЧ-спектроскопії ідентифікували отримані плівки Пан за допомогою Thermo Scientific Nicolet iZ10 Smart ITR. Спектри отримували в інтервалі хвильових чисел 400–4 000 cm^{-1} за температури 293 К.

Для тестування сенсорних властивостей поліаніліну отримані зразки поміщали в кюветне відділення спектрофотометра inSpect-105UV і визначали значення оптичної густини (D_0) в інтервалі 400–1100 нм за температури 293 К. Як еталон застосо-

ували чисту скляну пластинку із шаром SnO_2 . Після цього плівки витримували в камері з парами органічних амінів (концентрація пари становила 0,25 mg/cm^3) упродовж 1–10 хвилин до встановлення стаціонарного значення оптичної густини (D) і знімали спектр у тому ж спектральному діапазоні.

Результати

Синтезовані методом хімічного осадження плівки ПАН ідентифіковані методом ІЧ-спектроскопії (рис. 3). На отриманому ІЧ-спектрі простежуються піки, які є харак-

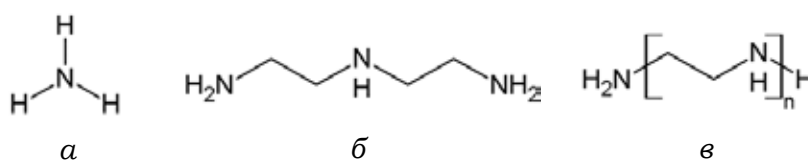


Рис. 2. Структурні формули: а – аміак; б – ДЕТА; в – ПЕПА

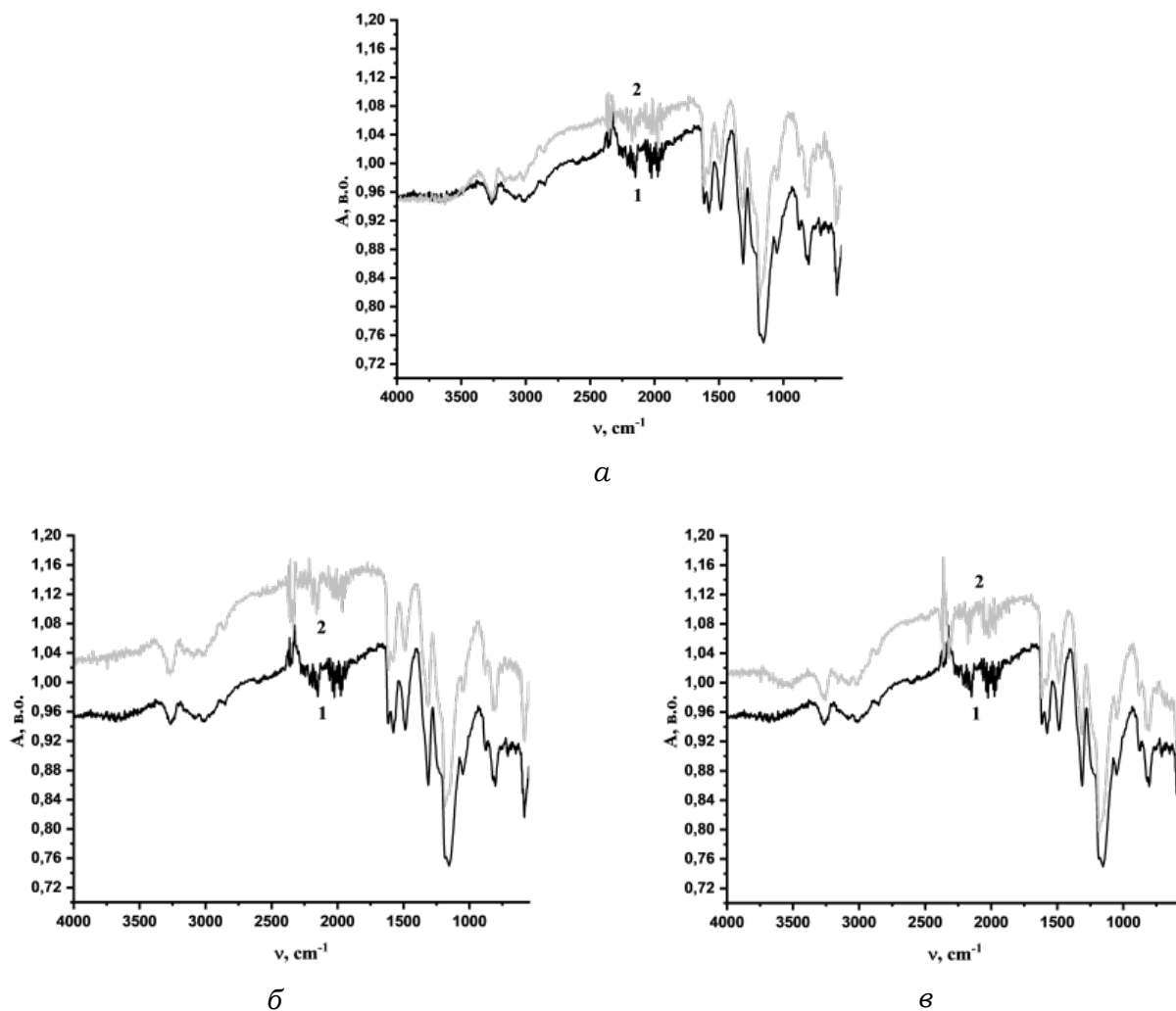


Рис. 3. ІЧ-спектри ПАН (1) під дією: а – NH_3 (2); б – ДЕТА (2); в – ПЕПА (2)

терними для ПАН, одержаного іншими методами синтезу (Rahman et al., 2022). Отриманий полімер має характеристичні смуги в області 3 500–3 100 см^{-1} , які при-таманні валентним коливанням груп – NH і NH_2 . Характерні піки валентних коливань C = N і C = N хіноїдних і бензоїдних кілець на 1 539 та 1 406 см^{-1} відповідно. Пік за 1 278 см^{-1} – асиметричні деформаційні C – N вторинного ароматичного аміну. Смуга на 1 075 см^{-1} належить ароматичним C – N площинним коливанням хіноїдного кільця. 933 см^{-1} – ароматичні C – N позаплощинні коливання бензоїдного кільця.

Для дослідження сенсорних властивостей плівок поліаніліну, які нанесено на підкладку, покриту станумом оксидом, спочатку виміряно густину оптичного поглинання отриманих зразків у діапазоні 400–1 000 нм за наявності випарів речовин

амінного типу (рис. 4). Як модельний об'єкт вибрано молекулу аміаку без органічних функціональних груп. Спектри оптичного поглинання під дією аміаку наведені на рис. 4-а, криві 2, 3.

Чутливість плівок ПАН до дії аміновмісних речовин визначено як відносну зміну оптичної густини $|D - D_0|/D_0$ на зазначеній довжині хвилі, а швидкодію як $|\Delta D|/\tau$, де τ – час витримки (табл. 1).

Отримані результати показують, що за довжини хвилі 600 нм чутливість плівки ПАН є максимальною для всіх досліджуваних газів. Проте реакція зразків на аміак і ПЕПА є більш помітною, ніж на ДЕТА. За довжини хвилі 600 нм значення сенсорної чутливості більше майже втричі, а за 820 нм – удвічі. Швидкодія плівок ПАН є найбільшою під впливом аміаку за довжини хвилі 600 нм, а під дією органічних амінів – за 820 нм.

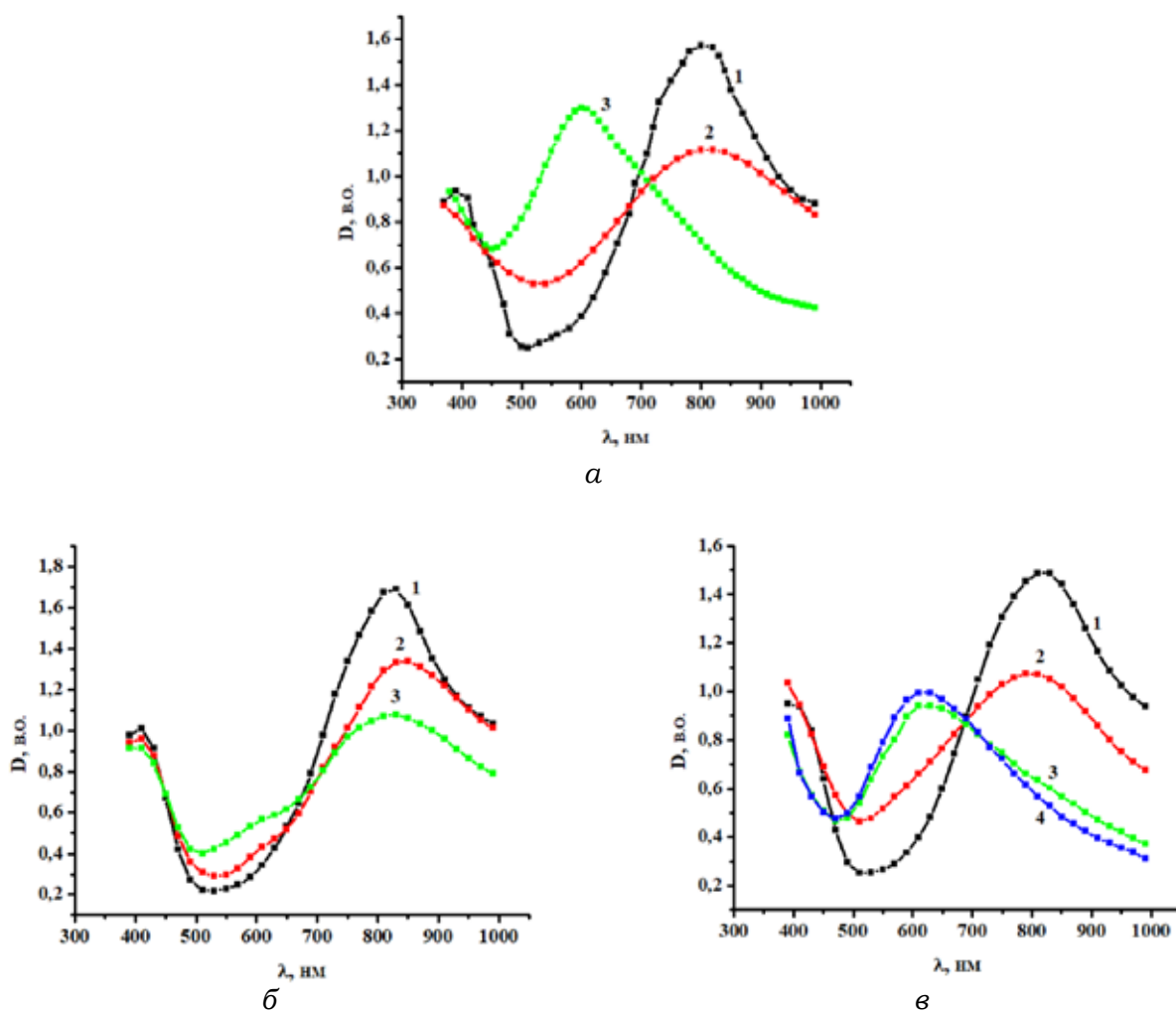


Рис. 4. Спектри поглинання ПАН (1) під дією а – аміаку: 2–3 хв; 3–6 хв; б – ДЕТА: 2–6 хв; 3–9 хв; в – ПЕПА: 2–3 хв; 3–6 хв; 4–10 хв

Таблиця 1

Чутливість і швидкодія півок ПАН до дії аміновмісних речовин

Довжина хвилі, нм	Чутливість, %			Швидкодія, 10 ⁻³ , с ⁻¹		
	NH ₃	ДЕТА	ПЕПА	NH ₃	ДЕТА	ПЕПА
600	225	71,4	233	2,5	0,5	1,2
820	56,7	35,3	60	2,4	1,1	1,5

Обговорення

Отримані результати свідчать про високу чутливість поліаніліну, отриманого хімічним осадженням, до дії аміаку й органічних амінів. ІЧ-спектри зразків під дією аміновмісних речовин показують збільшення інтенсивності поглинання смуги в діапазоні 3 500–3 100 см⁻¹, що свідчить про збільшення вмісту аміновмісних фрагментів у півці ПАН. Водночас смуги, які відповідають бензо-хіноїдним фрагментам, мають більшу інтенсивність за 1 539 та 1 406 см⁻¹. Можна припустити, що це пов'язано із частковою нейтралізацією емеральдинової сольової форми поліаніліну та збільшенням вмісту його непровідної основної форми.

Згідно з даними оптичної спектроскопії у ближній УФ, видимій і ближній ІЧ області, спектри півки ПАН в діапазоні 400–1 000 нм характеризуються наявністю двох смуг (див. рис. 4-а, крива 1), що характерно для даного полімеру (Tsizh et al., 2020). Максимум першої смуги спостерігається за 400 нм та відповідає π-π*-переходу у спряженій системі полімеру. Друга смуга перебуває в діапазоні 700–900 нм, її пік розташований за λ = 820 нм. Ця смуга відповідає поглинанню носіїв заряду поляронного типу (іміно-хіноїдні катіон-радикали), що підтверджує утворення провідної напівокисненої форми ПАН, а саме – емеральдинової солі з яскраво зеленим забарвленням (див. рис. 1-а).

Встановлено, що під дією аміаку відбуваються суттєві зміни у спектрах оптичного поглинання ПАН. У початковий період дії аміаку від 30 до 180 с відбувається зменшення оптичної густини смуги за 820 нм (див. рис. 4-а, крива 2). Імовірно, спостережені зміни пов'язані зі зменшенням концентрації носіїв заряду поляронного типу внаслідок часткової нейтралізації протонованої форми ПАН (Ціж та ін., 2016). За більш тривалого часу дії газу відбувається значний зсув цієї смуги майже на 200 нм, формується нова смуга з максимумом за 590 нм, яка притаманна аміно-хіноїдним структурам нейтралізованої форми полімеру. Колір півки змінюється з яскраво-зеленого,

характерного для емеральдинової солі ПАН, на темно-синій, властивий емеральдиновій основі (рис. 1-б).

Під час дії органічних амінів характер зміни оптичного поглинання має свої особливості (рис. 4-б). У результаті дії парів ДЕТА протягом 6 і 9 хвилин спостерігаємо зменшення оптичної густини смуги за 820 нм, тоді як в області від 500 до 650 нм зростає оптичне поглинання, що може бути пов'язане зі збільшенням концентрації аміно-хіноїдних фрагментів. Водночас швидкість таких змін невисока внаслідок меншої активності аміногрупи, зв'язаної з вуглеводневим ланцюгом ДЕТА (рис. 2-б).

На відміну від ДЕТА під дією ПЕПА зміна оптичної густини та зміщення максимуму смуги поглинання за 820 нм виявляється більш помітно (рис. 4-в). Значення ΔD становить 0,5 за часу витримки 3 хвилини для ПЕПА, а для ДЕТА – 0,2 за 6 хвилин. Збільшення часу витримки приводить до зсуву довгохвильової смуги та формуванню смуги з максимумом за 610 нм (див. рис. 4-в, криві 3, 4). У діапазоні довжин хвиль 700–1 000 нм спостерігається зменшення оптичної густини, проте в області 500–700 нм оптичне поглинання збільшується. Такі ж зміни у спектрі поглинання півки ПАН спостерігалися під дією аміаку. Стаціонарне значення оптичної густини досягається в результаті дії ПЕПА протягом 6 хвилин (див. рис. 4-в, криві 3, 4).

Особливості поведінки оптичних спектрів ПАН під дією ДЕТА і ПЕПА зумовлюються як хімічною будовою цих речовин, так і здатністю до адсорбції на поверхні півки. Цим чинником також зумовлена різна сенсорна чутливість до органічних амінів і швидкодія сенсора.

Висновки

1. Встановлено закономірності зміни оптичного поглинання півок поліаніліну, отриманих методом хімічної полімеризації, за дії аміновмісних речовин.

2. Досліджено ІЧ-спектри та спектри оптичного поглинання ПАН під дією аміаку, диетилентриаміну та поліетиленполіаміну. Показано, що досліджувані гази збільшують

інтенсивність поглинання піків, які відповідають аміновмісним і бензо-хіноїдним фрагментам.

3. Чутливість плівки ПАН до дії аміновмісних сполук залежить від їхньої молекулярної структури й може бути розташована в ряду ДЕТА < NH₃ < ПЕПА. За 600 нм значення чутливості до аміаку майже втричі більше, а за 820 нм – удвічі, ніж на ДЕТА. Швидкодія зразка є найбільшою під впливом аміаку за довжини хвилі 600 нм, а під дією органічних амінів – за 820 нм.

4. Отримані результати стануть основою для розроблення чутливих елементів оптич-

них сенсорів для виявлення токсичних амінів на забруднених територіях, у виробничих приміщеннях хімічних підприємств, складів тощо.

Подяки

Дослідження, викладені у статті, виконані за ґрантового фінансування Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності України» у рамках проекту 2023.04/0133 (Державний реєстраційний номер: 0124U003799) «Розробка детекторів для експрес-контролю токсичних речовин на забруднених територіях» (2024–2025 рр.).

Список використаної літератури

Аксиментьєва О.І. Електрохімічні методи синтезу і провідність спряжених полімерів. Львів : Світ, 1998. 154 с.

Ціж Б.Р., Аксиментьєва О.І., Ольхова М.Р., Горбенко Ю.Ю. Сенсорні властивості плівок поліаніліну, отриманих на оптично прозорих носіях. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького*. 2016. Т. 18. № 2 (68). С. 121–125. <https://doi.org/10.15421/nvlvet6824>.

Farea M.A., Mohammed H.Y., Shirsat S.M., Sayyad P.W., Ingle N.N., Al-Gahouari T., Mahadik M.M., Bodkhe G.A., Shirsat M.D. Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites : Review. *Chemical Physics Letters*. 2021. Vol. 776. P. 138703. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138703>.

Hudson N.L. Diethylenetriamine (DETA). *Skin notation profile*. 2021. № 102. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2021102>.

Heeger A.J. Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials. *Synth. Met*. 2001. Vol. 125. P. 23–42. <https://doi.org/10.1021/jp011611w>.

MacDiarmid A. “Synthetic metals”: a novel role for organic polymers. *Curr. Appl. Phys*. 2001. Vol. 1. P. 269–79. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010716\)40:14<2581](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010716)40:14<2581).

National Center for Biotechnology Information. [Electronic resource]. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Diethylenetriamine#section=Health-Hazards> (дата звернення: 16.01.2025).

Rahman M.M.K., Islam M., Amin K., Paul S.K., Rahman S., Talukder Md.M., Rahman Md.M. Simplistic fabrication of aniline and pyrrole-based poly(Ani-co-Py) for efficient photocatalytic performance and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 37860–37869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.296>.

Tirfie L.A., Tegegne N., Gashaw F. Recent progress in hybrid conducting polymers and metal oxide nanocomposite for room-temperature gas sensor applications : A review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023. Vol. 359. P. 114472. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114472>.

Tsizh B.R., Aksimentyeva O.I. Ways to improve the parameters of optical gas sensors of ammonia based on polyaniline. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 315. P. 112273. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112273>.

Wang H.H. Flexible Chemical Sensors. *Semiconductor Nanomaterials for Flexible Technologies*. 2010. Chapter 9. P. 247–273. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7823-6.00009-X>.

Yan Y., Yang G., Xu J.L., Zhang M., Kuo C.C., Wang S.D. Conducting polymer-inorganic nanocomposite-based gas sensors: a review. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2020. Vol. 21 (1). P. 768–786. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1820845>.

References

Aksimentyeva, O.I. (1998) Elektrokhimichni metody syntezy i providnist spryazhenykh polimeriv [Electrochemical synthesis methods and conductivity of conjugated polymers]. Lviv : Svit [Lviv: World]. 154 p. [in Ukrainian].

Tsizh, B.R., Aksimentyeva, O.I., Olhova, M.R., & Horbenko, Yu.Yu. (2016). Sensorni vlastyvo-sti plivok polianilinu, otrymanykh na optychno prozorykh nosiyakh [Sensory properties of poly-

aniline films obtained on optically transparent media]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterinarynoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S.Z. Gzhyts'koho* [Scientific Bulletin of the S.Z. Gzhytsky Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology], 18, 2 (68), 121–125. <https://doi.org/10.15421/nvlvet6824> [in Ukrainian].

Farea, M.A., Mohammed, H.Y., Shirsat, S.M., Sayyad, P.W., Ingle, N.N., Al-Gahouari, T., Mahadik, M.M., Bodkhe, G.A., & Shirsat, M.D. (2021). Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites: Review. *Chemical Physics Letters*, 776, 138703. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138703> [in English].

Hudson, N.L. (2021). Diethylenetriamine (DETA). *Skin notation profile*, 102. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2021102> [in English].

Heeger, A.J. (2001). Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials. *Synth. Met.*, 125, 23–42. <https://doi.org/10.1021/jp011611w> [in English].

National Center for Biotechnology Information. [Electronic resource] URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Diethylenetriamine#section=Health-Hazards> (access date 16.01.2025) [in English].

MacDiarmid, A. (2001). “Synthetic metals”: a novel role for organic polymers. *Curr. Appl. Phys.*, 1, 269–279. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010716\)40:14<2581](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010716)40:14<2581) [in English].

Rahman, M.M.K., Islam, M., Amin, K., Paul, S.K., Rahman, S., Talukder, Md.M., & Rahman, Md.M. (2022). Simplistic fabrication of aniline and pyrrole-based poly(Ani-co-Py) for efficient photocatalytic performance and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 37860–37869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.296> [in English].

Tirfie, L.A., Tegegne, N., & Gashaw, F. (2023). Recent progress in hybrid conducting polymers and metal oxide nanocomposite for room-temperature gas sensor applications: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 359, 114472. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114472> [in English].

Tsizh, B.R., & Aksimentyeva, O.I. (2020). Ways to improve the parameters of optical gas sensors of ammonia based on polyaniline. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, 112273. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112273> [in English].

Wang, H.H. (2010). Flexible Chemical Sensors. *Semiconductor Nanomaterials for Flexible Technologies*, Chapter 9, 247–273. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7823-6.00009-X> [in English].

Yan, Y., Yang, G., Xu, J.L., Zhang, M., Kuo, C.C., & Wang, S.D. (2020). Conducting polymer-in-organic nanocomposite-based gas sensors: a review. *Science and Technology of Advanced Materials*, 21 (1), 768–786. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1820845> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025