

ORCID: 0009-0000-3934-9136

М. С. ПОПОВИЧ

аспірант кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
Черкаси, Україна,
alonmack@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8267-8365

Д. І. КОЛОМІЄЦЬ

викладач кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
Черкаси, Україна,
denyskolomiets95@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4950-394X

А. Р. ГОНДА

аспірант кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
Черкаси, Україна,
andriy.gonda@vu.cdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7015-1662

Ю. О. ЛЯШЕНКО

професор кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
Черкаси, Україна,
lyashenko.yurij@gmail.com

DOI:10.31651/2076-5851-2025-93-101

PACS: 81.05.Qk, 81.05.Je, 81.20.Ka

**ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ КОМПОЗИТІВ
ПОЛІАНІЛІНУ З ПЕНТАОКСИДОМ ВАНАДІЮ**

Проведено аналіз синтезованих композитів поліаніліну (PANI) за додавання пентаоксиду ванадію (V_2O_5) у вигляді дисперсного порошку та нанопоясів. Досліджено електропровідні та структурні властивості отриманих композитних матеріалів. Встановлено, що синтезований поліанілін характеризується електропровідністю, типовою для напівпровідникових полімерів, питома електропровідність PANI становить близько 0,007 См/см, тоді як для композитів PANI/ V_2O_5 цей показник зменшується до значень близько 0,004 См/см. За результатами рентгеноструктурного аналізу встановлено, що на дифрактограмах композитних зразків характерні кристалічні дифракційні піки V_2O_5 істотно послаблюються або практично не проявляються, тоді як загальний профіль розсіювання визначається аморфною фазою полімерної матриці.

Ключові слова: поліанілін, PANI, пентаоксид ванадію, V_2O_5 , електропровідність, полімерний композит.

1. Вступ

За останні десятиліття електропровідні полімери почали розглядати як окремий клас матеріалів, що викликає значний інтерес завдяки унікальним електричним, оптичним та фізико-хімічним властивостям. Серед них поліанілін (PANI) займає провідні позиції завдяки простоті синтезу у водневих середовищах, екологічній стійкості та здатності змінювати електропровідність [1]. Однак для розширення функціональних можливостей полімерів перспективним напрямком є створення гетерогенних композитів, зокрема типу «органіка–неорганіка». Введення наночастинок оксидів металів, зокрема V_2O_5 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO та інших, у полімерну матрицю дає змогу мінімізувати недоліки окремих компонентів і сформувати композиційні матеріали з новими каталітичними та електричними характеристиками [2, 3]. Особливу увагу привертає система поліанілін / пентаоксид ванадію (PANI/ V_2O_5). Оксид ванадію V_2O_5 є найбільш стабільним з'єднанням у системі V–O із шириною забороненої зони близько 2,2 eV та здатністю до фазових переходів типу метал–напівпровідник [1]. Поєднання його з PANI дозволяє знизити енергію забороненої зони композиту, полегшуючи електронні переходи, що є критично важливим для застосувань у сенсорах, фотокаталізі та елементах живлення. Важливим фактором, що впливає на фізико-хімічні властивості таких композитів, є метод їх синтезу. Найбільш ефективним підходом вважається метод хімічної полімеризації [1, 4]. На відміну від механічного змішування, цей метод передбачає окислення мономеру аніліну безпосередньо в присутності диспергованих частинок оксиду. Це забезпечує включення наночастинок у полімерну сітку та формування морфології, де полімерні ланцюги обгортають неорганічні ядра, забезпечуючи велику площу контакту між фазами [1].

Метою даної роботи є одержання композитів пентаоксиду ванадію з електропровідним полімером (PANI) методом полімеризації з використанням наповнювача V_2O_5 як у вигляді порошків, так і у вигляді синтезованих нанопоясків, аналіз впливу морфології наповнювача на процеси структуроутворення та встановлення кореляції між умовами синтезу і кінцевими властивостями отриманих матеріалів, а також дослідження електропровідних властивостей отриманих композитів.

2. Методика синтезу та матеріали

Синтез композитів PANI/ V_2O_5 було проведено методом наповнення реакційної суміші дрібнодисперсними оксидами V_2O_5 [1]. Для синтезу використовували реактиви аналітичної чистоти без додаткового очищення та обробки.

Формування композитних матеріалів здійснювали з використанням двох типів неорганічного наповнювача: вихідного комерційного порошку та попередньо синтезованих нанопоясків. Комерційний порошок V_2O_5 , що застосовувався безпосередньо для синтезу одного з типів композиту, також був основою для створення 1D-структур (нанопоясків), мав розмір частинок від 1 до 100 мкм. Одержання нанопоясків пентаоксиду ванадію проводили згідно з методикою, описаною в [5, 6]. Сформовані нанопояски, що в подальшому слугували основою для синтезу другого типу композиту з поліаніліном, характеризуються середньою довжиною 2-3 мкм та середньою шириною 42,6 нм.

Синтез композитів проводили таким чином, щоб провідний полімер рівномірно обгортав неорганічні частинки, забезпечуючи контакт між фазами. Спочатку було виготовлено основу, коли порошок або нанопояски пентаоксиду ванадію (V_2O_5)

змішувались із розчином соляної кислоти. Для запобігання злипанню та агломерації частинок суміш піддавали ультразвуковій обробці протягом 1 години, після чого ще 1 годину перемішували на магнітній мішалці. Така підготовка основи для подальшого синтезу забезпечує рівномірний розподіл неорганічних частинок у полімерній матриці та створює сприятливі умови для формування подальшої композитної структури.

У підготовлений розчин додавали мономер, анілін гідрохлорид $C_6H_5NH_2 \cdot HCl$. Ці молекули згодом полімеризуються, утворюючи довгі ланцюги провідного полімеру. Суміш поміщали у ємність із льодом, підтримуючи температуру в діапазоні $0-5\text{ }^\circ\text{C}$. Таке охолодження забезпечує повільний і контрольований перебіг реакції, у разі перегріву утворюваний полімер може містити дефекти і втратити провідні властивості.

Далі проводився процес полімеризації. До охолодженої суміші дуже повільно, по краплі на секунду, додавали окислювач, персульфат амонію $(NH_4)_2S_2O_8$ (Рис.1). Під дією персульфат амонію молекули аніліну починали полімеризуватися, утворюючи ланцюги прямо на поверхні частинок оксиду ванадію. Після 2 годин інтенсивного перемішування охолоджену суспензію залишали для завершення синтезу при кімнатній температурі протягом 12–16 годин. У цей період розчин набуває насиченого темно-зеленого кольору, що свідчить про утворення провідної форми поліаніліну.

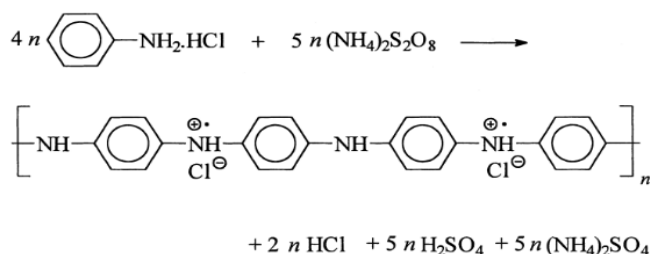


Рис.1. Схема окислювальної полімеризації анілін гідрохлориду в кислому середовищі з утворенням провідної форми полімеру [4].

Fig. 1. Schematic representation of the oxidative polymerization of aniline in an acidic environment with the formation of a conductive polymer form [4].

Завершальним етапом було очищення отриманого осаду від побічних продуктів реакції. Матеріал фільтрували і промивали послідовно, спочатку дистильованою водою, потім слабким розчином соляної кислоти, а наприкінці етиловим спиртом. Така обробка дозволяє видалити побічні продукти реакції та дрібні олігомери, які можуть погіршити електричні властивості синтезованого композиту. Очищений порошок сушили у сушильній шафі при температурі $60\text{ }^\circ\text{C}$ для видалення залишкової вологи без порушення структури полімеру.

На кожному з етапів було виміряно рН розчину, значення якого ви можете побачити в Таблиці 1.

Таблиця 1.

Значення рН на різних етапах синтезу композиту PANI/пентаоксид ванадію
Table 1.
pH values at different stages of PANI/vanadium pentoxide composite synthesis

Етап / Склад розчину	Значення рН
----------------------	-------------

HCl	0,36
HCl+V ₂ O ₅ (30% мас.)	0,41
HCl+V ₂ O ₅ (30% мас.) + анілін гідрохлорид	0,45
HCl+V ₂ O ₅ (30% мас.) + анілін гідрохлорид(після ультразвуку)	0,62
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ розчинений у воді	1,47
Кінцевий розчин перед промиванням	0,08

Морфологію поверхні синтезованих матеріалів досліджували методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ). Для проведення мікроскопічних досліджень зразки готували шляхом нанесення краплі розчину на основі синтезованого поліаніліну на металеву підкладку з берилію. Поверхня берилієвої пластини була попередньо ретельно відшліфована та відполірована для мінімізації фонові шорсткості.

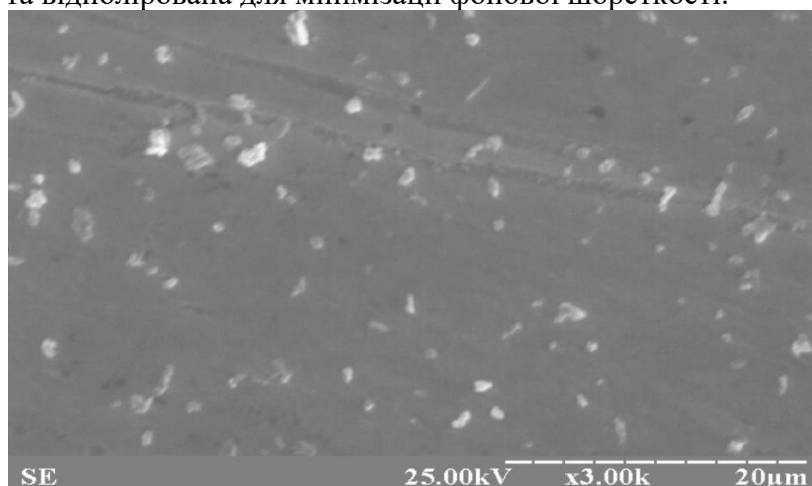


Рис. 2. REM знімок синтезованого порошку PANI
Fig. 2. REM image of synthesized PANI powder

РЕМ-аналіз (див. Рис. 2) дозволив дослідити морфологію полімеру. Матеріал представлений дисперсними частинками поліаніліну та їхніми мікроагломератами неправильної форми на чорному фоні від берилієвої пластини, розміри яких варіюються переважно від 0,5 до 5 мкм. Наявність візуально світліших ділянок всередині частинок зумовлено ефектом локального накопичення заряду під дією пучка електронів через погіршений електричний контакт окремих полімерних частинок із підкладкою.

3. Результати досліджень та обговорення

Синтезовані зразки композитів PANI/V₂O₅ досліджували методами рентгенівської дифрактометрії (XRD). Масиви експериментальних значень інтенсивностей і кутів дифракції зразків отримували за допомогою автоматичного монокристалічного дифрактометра DRON 2 з Fe K α -випромінюванням ($\lambda = 0,19373$ нм).

Для детального розуміння фазового складу та надмолекулярної структури дифрактограми композитів порівнювали з рентгенограмами вихідних речовин.

Дифрактограма вихідного комерційного порошку V₂O₅ (Рис. 3а) характеризується наявністю інтенсивних піків. За результатами рентгенівських досліджень встановлено, що домінуючі рефлекси спостерігаються при кутах 2 θ близько 15°, 26°, 31°, 33° та 40°. Цей набір дифракційних максимумів чітко відповідає кристалічній модифікації пентаоксиду ванадію та підтверджує кристалічну природу вихідного неорганічного наповнювача.

Для порівняння також було проаналізовано спектр чистого поліаніліну (PANI), синтезованого без додавання неорганічного компонента (рис. 3б). Аналіз цієї

дифрактограми демонструє абсолютне домінування аморфної фази. Для матеріалу характерна наявність широкого гало-розсіювання в діапазоні кутів $2\theta \approx 15^\circ\text{--}25^\circ$. Такий профіль є типовим для провідної форми поліаніліну і свідчить про наявність ближнього порядку в упакованні полімерних ланцюгів за повної відсутності дальнього тривимірного кристалічного порядку.

Дифракційні криві композитів PANI/ V_2O_5 , отриманих шляхом додавання 10 мас. % (рис. 2c) та 30% мас. (Рис. 2d) дисперсного порошку, демонструють виражений структурний ефект. Загальний профіль розсіювання для обох зразків практично ідентичний профілю вихідного поліаніліну, попри наявність неорганічного наповнювача. Характерні кристалічні піки V_2O_5 проявляються дуже слабо або зовсім відсутні. Така картина пояснюється ефектом екранування (shielding effect). Оскільки частинки дисперсного порошку мають неправильну форму і схильні до агломерації, полімеризація аніліну методом *in-situ* на них відбувається хаотично. Макромолекули інтенсивно адсорбуються на поверхні, утворюючи щільну та товсту оболонку. Враховуючи, що густина полімеру значно менша за густина оксиду, об'ємна частка полімерного шару є суттєвою. Цей аморфний шар поглинає та розсіює рентгенівське випромінювання, маскуючи сигнал від кристалічного ядра. Це свідчить про успішне формування ізотропного композиту зі структурою типу «ядро-оболонка», у якому провідні області розділені численними бар'єрами.

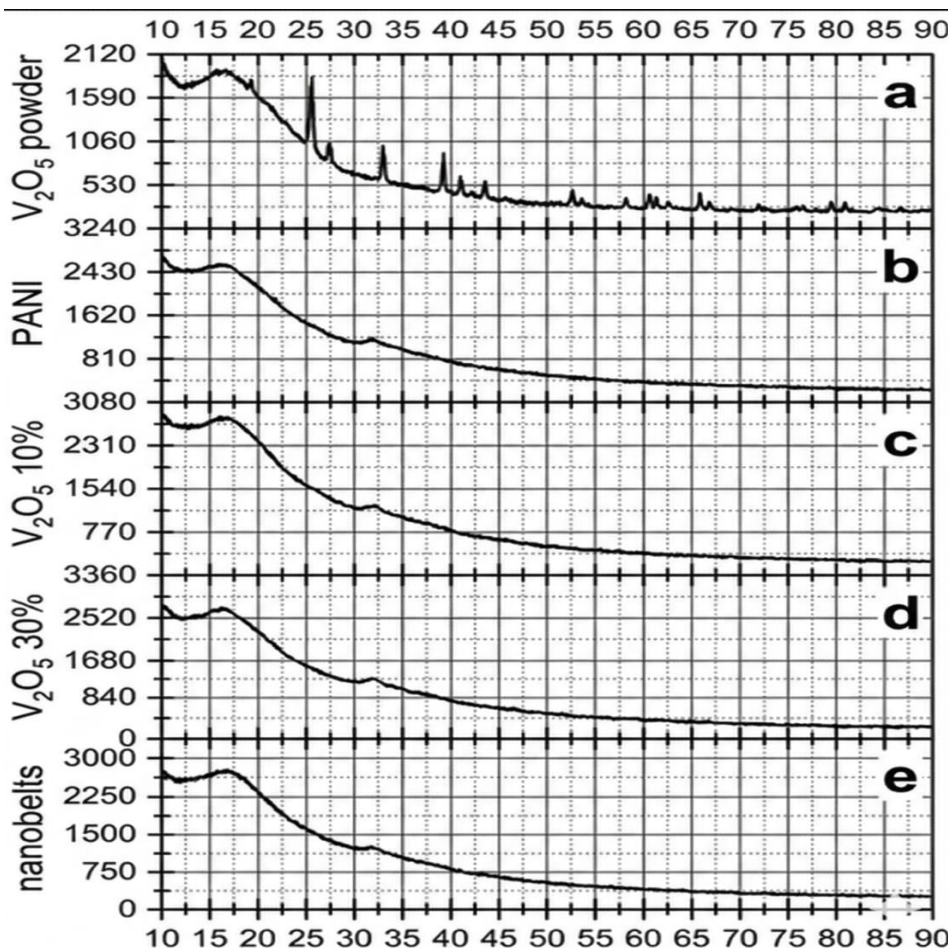


Рис. 3. Спектри рентгенівської дифрактометрії синтезованих PANI з різним відсотковим вмістом пентаоксиду ванадію.

Fig. 3. X-ray diffraction spectra of synthesized PANIs with different percentages of vanadium pentoxide.

Дифрактограма композиту, синтезованого з використанням нанопоясків V_2O_5 (Рис. 3e), демонструє профіль розсіювання, який є надзвичайно схожим на дифрактограму чистого поліаніліну (Рис. 3b). Як і у випадку композитів з дисперсним порошком, загальний вигляд кривої повністю домінується широким аморфним гало полімерної матриці в області кутів $2\theta \approx 15^\circ\text{--}25^\circ$. Це свідчить про те, що використання нанопоясків як неорганічного наповнювача, незважаючи на їхню специфічну одновимірну (1D) форму, суттєво не змінило надмолекулярну структуру поліаніліну порівняно з порошковими системами.

Спираючись на отримані експериментальні дані для порошка та літературні дані щодо синтезу нанопоясків [5, 6], можна провести порівняльний аналіз механізмів структурного утворення. У випадку використання дисперсного порошку V_2O_5 його частинки мають неправильну форму і схильні до агломерації. Полімеризація аніліну на таких частинках відбувається хаотично, полімерні ланцюги обгортають агломерати, проте полімерні ланцюги залишаються орієнтованими хаотично. Це призводить до утворення ізотропного композиту, у якому провідні області розділені численними бар'єрами, що обмежують електричну провідність.

Натомість за використання нанопоясків V_2O_5 (1D-структури) механізм взаємодії змінюється, оскільки їхня одновимірна форма та специфічні поверхневі властивості сприяють впорядкованому росту полімерних ланцюгів. Нанопояски характеризуються високим співвідношенням довжини до ширини та специфічною поверхневою енергією на кристалічних гранях, вони виступають як матриця для росту полімеру. Молекули аніліну впорядковано адсорбуються вздовж поверхні нанопояска за рахунок водневих зв'язків між аміногрупами аніліну та атомами кисню. Внаслідок цього формуються одновимірні полімерні структури, де полімерні ланцюги ростуть вздовж осі нанопояска, утворюючи впорядковану коаксіальну структуру.

Для визначення ступеня електропровідності синтезованих композитних матеріалів на основі PANI, було виготовлено дослідні зразки у вигляді пресованих таблеток масою 0,1 г кожна. Параметри зразків: товщина – 2 мм, діаметр – 7 мм. Формування таблеток здійснювалось за допомогою спеціальної прес-форми та за прикладеного тиску 100 кгс/см^2 , це забезпечувало ущільнення матеріалу та відтворюваність геометричних характеристик зразків. Після отримання дослідних зразків їхні поверхні піддавали механічній обробці з метою вирівнювання контактних площин. Це було необхідно для забезпечення надійного електричного контакту під час вимірювань, що, у свою чергу, підвищувало точність визначення електричного опору. Після цього експериментально визначали електропровідність композитних зразків шляхом вимірювання їхнього електричного опору за допомогою комбінованого приладу RLC-метра (СЕМ DT-9935). Для проведення вимірювань було розроблено та виготовлено вертикальний прес із двома паралельними мідними контактами, між якими зразок затискався із зусиллям $\approx 2 \text{ кгс/см}^2$. Покази приладу фіксували в результаті серії вимірювань для кожного зразка. Перед кожним вимірюванням поверхні мідних контактів очищали для усунення оксидних плівок. На основі усереднених значень електричного опору розраховували питому електропровідність з урахуванням геометричних параметрів зразків. Отримані результати наведено в Таблиці 1.

Таблиця 2. Електрофізичні характеристики синтезованих зразків PANI та полімерних композитів з різним вмістом пентаоксиду ванадію
Table 2. Electrophysical characteristics of synthesized samples of PANI and polymer composites with different vanadium pentoxide contents

Склад зразка	Електричний опір, (Ом)	Питома електропровідність $\chi \times 10^{-3}$, (См/см)
Пресована таблетка PANI	72	7,22
Пресована таблетка PANI + V ₂ O ₅ (10% мас.)	129,8	4
Пресована таблетка PANI + V ₂ O ₅ (30% мас.)	130,1	3,99
Пресована таблетка PANI + nanobelts (10% мас.)	140	3,71

Отримані результати демонструють, що найвищою питомою електропровідністю володіє зразок чистого поліаніліну. Введення пентаоксиду ванадію (V₂O₅) до полімерної матриці знижує загальну електропровідність композиту. Це пояснюється фізико-хімічними властивостями компонентів та процесами на межі їх поділу. V₂O₅ має власну напівпровідникову провідність, нижчу за провідну форму поліаніліну, і дисперговані частинки оксиду можуть виконувати роль додаткових центрів розсіювання носіїв заряду, підвищуючи опір композиту. Крім того, електричні характеристики змінюються через окисно-відновну активність V₂O₅, який взаємодіє з макроланцюгами поліаніліну, частково змінюючи ступінь легування або окиснення іонів ванадію на межі фаз.

4. Висновки

У роботі проведено порівняльний аналіз структурних особливостей та механізмів формування композитів PANI/V₂O₅, синтезованих in-situ з використанням комерційного дисперсного порошку та 1D-нанопоясків пентаоксиду ванадію.

За результатами рентгеноструктурного дослідження встановлено, що у композитах на основі нанопоясків дифракційні піки кристалічної фази V₂O₅ відсутні. Це пояснюється ідеальним екрануванням неорганічної 1D-матриці суцільною та щільною аморфною оболонкою поліаніліну. Проте, незважаючи на те, що метод XRD не фіксує присутність кристалічного пентаоксиду ванадію у кінцевому матеріалі, дані дослідження електропровідності однозначно підтверджують його визначальний вплив на надмолекулярну структуру композиту PANI/V₂O₅.

Подяки

Стаття підготовлена за результатами прикладного дослідження «Гідромеханічний синтез наноструктурного пентаоксиду ванадію та дослідження його властивостей» (номер державної реєстрації 0125U001491) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Список використаної літератури:

1. Islam S. Synthesis, electrical conductivity, and dielectric behavior of polyaniline/V₂O₅ composites / S. Islam, G. B. V. S. Lakshmi, A. M. Siddiqui, M. Husain, M. Zulfequar // International Journal of Polymer Science. – 2013. – Vol. 2013, No 1. – P. 307525. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1155/2013/307525>
2. Budak B. Synthesis and characterization of PANI and PANI/nanometal oxides, photocatalytic and adsorbent applications / B. Budak, S. Demirel // Turkish Journal of Chemistry. – 2023. – Vol. 47, No 2. – P. 346–363. – Режим доступу: <https://doi.org/10.55730/1300-0527.3542>
3. Загорний М. М. Синтез текстурованого поліаніліну в присутності органічних і неорганічних допантів різного хімічного складу / М. М. Загорний, О. Г. Жигоцький, Г. В. Лашкар'юв, В. І. Лазоренко, А. В. Рагуля // Український хімічний журнал. – 2007. – Т. 73, № 1. – С. 51–56. – Режим доступу: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/7b14f928-7e58-4b0b-a63a-2421ad8dccb1>

4. Stejskal J. Polyaniline. Preparation of a conducting polymer (IUPAC technical report) / J. Stejskal, R. G. Gilbert // *Pure and Applied Chemistry*. – 2002. – Vol. 74, No 5. – P. 857–867. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1351/pac200274050857>
5. Король Я. Д. Особливості процесу формування нанорозмірного V_2O_5 при перемішуванні водних суспензій / Я. Д. Король // Вісник Черкаського університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2021. – № 1. – С. 3–11. – Режим доступу: <https://eprints.cdu.edu.ua/5205/>
6. Коломієць Д. І., Пасічний М. О., Король Я. Д. Гідротермічний метод синтезу нанопоясків оксиду ванадію V_2O_5 при інтенсивному перемішуванні // Вісник Черкаського університету: Серія «Фізико-математичні науки». – 2020. – No1. – С. 53-58. – Режим доступу: <https://eprints.cdu.edu.ua/5211/>

References:

1. Islam, S., Lakshmi, G. B. V. S., Siddiqui, A. M., Husain, M., & Zulfequar, M. (2013). Synthesis, electrical conductivity, and dielectric behavior of polyaniline/ V_2O_5 composites. *International Journal of Polymer Science*, 2013(1), 307525. – Retrieved <https://doi.org/10.1155/2013/307525>
2. Budak, B., & Demirel, S. (2023). Synthesis and characterization of PANI and PANI/nanometal oxides, photocatalytic and adsorbent applications. *Turkish Journal of Chemistry*, 47(2), 346-363. – Retrieved <https://doi.org/10.55730/1300-0527.3542>
3. Zahornyi, M. M., Zhyhotskyi, O. H., Lashkarev, H. V., Lazorenko, V. I., & Ragulya, A. V. (2008). Synthesis of textured polyaniline in the presence of organic and inorganic dopants of various chemical composition. *Nanostructured Materials Science*, (1), 51–57. Retrieved <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/items/7b14f928-7e58-4b0b-a63a-2421ad8dccc1>
4. Stejskal, J., & Gilbert, R. G. (2002). Polyaniline. Preparation of a conducting polymer (IUPAC technical report). *Pure and applied chemistry*, 74(5), 857-867.– Retrieved <https://doi.org/10.1351/pac200274050857>
5. Korol, Y. D. (2021). Features of the process of nanoscale V_2O_5 formation under mixing of aqueous suspensions. *Bulletin of Cherkasy University. Series: Physical and Mathematical Sciences*, (1), 3–11. Retrieved <https://eprints.cdu.edu.ua/5205/>
6. Kolomiets D. I., Pasichniy M. O., Korol Y. D. (2020) Hydrothermal method of synthesis of nanobelts of vanadium oxide V_2O_5 with intensive mixing. *Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, 1(1), 53-58.– Retrieved from: <https://eprints.cdu.edu.ua/5211/>

M. S. POPOVICH

Postgraduate student of the Department of Physics,
Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
alonmack@gmail.com

D. I. KOLOMIETS

Lecturer of the Department of Physics,
Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
denyskolomiets95@gmail.com

A. R. HONDA

Postgraduate student of the Department of Physics,

Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine
andriy.gonda@vu.edu.ua

Yu. O. LYASHENKO
Professor of the Department of Physics,
Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
lyashenko.yurij@gmail.com

CHARACTERISTIC FEATURES OF THE SYNTHESIS OF POLYANILINE COMPOSITES WITH VANADIUM PENTOXIDE

DOI:10.31651/2076-5851-2025-93-101

PACS: 81.05.Qk, 81.05.Je, 81.20.Ka

A comprehensive analysis was conducted on polyaniline (PANI) composites synthesized with the addition of vanadium pentoxide (V_2O_5) in the form of dispersed powder and one-dimensional nanobelts. The electrical, morphological, and structural properties of the resulting composites were investigated, and the influence of the filler's shape and size on the polymer matrix formation was assessed. It was established that the synthesized polyaniline exhibits electrical conductivity typical of semiconducting polymers, with a specific conductivity of approximately 0.007 S/cm, whereas for PANI/ V_2O_5 composites this value decreases to around 0.004 S/cm. The reduction in conductivity is attributed to the physicochemical characteristics of V_2O_5 , which act as additional scattering centers for charge carriers, as well as to the specific redox interactions between the polymer matrix and the oxide surface, affecting the structure and conformation of the polymer chains. X-ray diffraction analysis revealed that in the composite samples the characteristic crystalline peaks of V_2O_5 are significantly weakened or almost absent, while the overall scattering profile is dominated by the amorphous phase of the polymer matrix. This structural effect indicates intense adsorption of the polymer chains on the surface of oxide particles during synthesis, confirming the integration of vanadium pentoxide into the composite structure and the formation of a heterogeneous "core-shell" system.

Keywords: polyaniline, PANI, vanadium pentoxide, V_2O_5 , electrical conductivity, polymer composite.

Одержано редакцією 10.10.2025

Прийнято до друку 15.11.2025

Опубліковано 24.12.2025