

УДК 544.72

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-4>

Вікторія ЛОВЧИЦЬКА

лаборант кафедри фізичної та колоїдної хімії, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0009-0005-4932-780X

Ярослав КОВАЛИШИН

доцент кафедри фізичної та колоїдної хімії, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0002-0373-1832

Бібліографічний опис статті: Ловчицька, В., Ковалишин, Я. (2025). Модифікація графітової поверхні відновленням діазосоли та її вплив на змочуваність. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 4, 28–34, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-4>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМОЧУВАНІСТІ ГРАФІТОВОЇ ПОВЕРХНІ, МОДИФІКОВАНОЇ ВІДНОВЛЕННЯМ ДІАЗОСОЛІ У ВОДНО-АЦЕТОНІТРИЛЬНОМУ РОЗЧИНІ

При отриманні композитних матеріалів на основі графіту та електропровідних полімерів важливим є забезпечити добру взаємодію між компонентами, що дає змогу покращити властивості таких матеріалів. Цього можна досягти ще на етапі підготовки синтезу шляхом модифікації графітових поверхонь з метою забезпечення доброї їх змочування розчинами вихідних мономерів. Метою роботи є модифікація поверхні графіту МПГ-7 шляхом відновлення 4-ацетамінофенілдіазоній тетрафторборату у водно-ацетонітрильному розчині під дією гіпофосфіту натрію. Наступним етапом модифікації поверхні є обробка її кислотою з метою гідролізу привитих до поверхні ацетамінофенільних груп з утворенням амінофенільних груп. Досліджено змочуваність модифікованої поверхні розчинами аніліну в соляній кислоті. Для цього визначали крайовий кут змочування використовуючи метод лежачої краплі.

Хімічна модифікація поверхні графіту шляхом відновлення діазонієвої солі суттєво покращує його змочуваність водними розчинами. Навіть у випадку чистої води середнє значення косинуса крайового кута змочування $\cos \theta = 0,65$, порівняно з $\cos \theta = 0,32$ для немодифікованої поверхні. Розчини, які містять лише соляну кислоту характеризуються ще більшими значеннями $\cos \theta$, тобто змочують поверхню краще порівняно з водою, і набагато краще порівняно з немодифікованим графітом. Додавання до розчину аніліну спочатку призводить до зменшення $\cos \theta$, подальше збільшення концентрації аніліну супроводжується швидким збільшенням косинуса крайового кута змочування. Відповідний мінімум є найглибшим для розчинів з найменшою концентрацією HCl. Для 0,1 н аніліну в 0,5 н HCl значення $\cos \theta$ є найнижчим з усіх досліджених, але значно вищим, ніж для чистої води. Зі збільшенням концентрації кислоти глибина мінімуму зменшується. Такі результати зумовлені наявністю амінофенільних груп, здатних до утворення водневих зв'язків і протонування в солянокислому розчині аніліну. Як результат спостерігається підвищення гідрофільності поверхні та збільшення роботи адгезії.

Найвищі значення $\cos \theta$ і, відповідно, найкраща змочуваність модифікованої поверхні спостерігаються для концентрацій соляної кислоти 1,0–2,0 н та аніліну 1,0–2,0 н. Отримані результати підтверджують ефективність модифікації графітової поверхні методом відновлення діазосполук та можуть бути використані при синтезі електропровідних композитів.

Ключові слова: графіт, поверхневий натяг, крайовий кут змочування, анілін, адгезія.

Viktoriya LOVCHYTSKA

Laboratory Assistant at the Department of Physical and Colloid Chemistry, Ivan Franko National University of Lviv, 1 Universytetska str., Lviv, Ukraine, 79005

ORCID: 0009-0005-4932-780X

Yaroslav KOVALYSHYN

Associate Professor at the Department of Physical and Colloid Chemistry, Ivan Franko National University of Lviv, 1 Universytetska str., Lviv, Ukraine, 79005

ORCID: 0000-0002-0373-1832

To cite this article: Lovchytska, V., Kovalyshyn, Ya. (2025). Modyfikatsiia hrafitovoi poverkhni vidnovlenniam diazosoli ta yii vplyv na zmochuvanist [Modification of the graphite surface by diazosalt reduction and its influence on wettability]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 4, 28–34, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-4>

MODIFICATION OF GRAPHITE SURFACE BY REDUCTION OF DIAZONIUM SALT AND ITS EFFECT ON WETTABILITY

When obtaining composite materials based on graphite and electrically conductive polymers, it is important to ensure good interaction between the components, which allows improving the properties of such materials. This can be achieved even at the stage of preparation for synthesis by modifying graphite surfaces in order to ensure their good wetting by solutions of the starting monomers. The aim of the work is to modify the surface of graphite MPG-7 by reducing 4-acetaminophenyldiazonium tetrafluoroborate in an aqueous acetonitrile solution under the action of sodium hypophosphite. The next stage of surface modification is to treat it with acid in order to hydrolyze the acetaminophenyl groups grafted to the surface with the formation of aminophenyl groups. The wettability of the modified surface by solutions of aniline in hydrochloric acid was studied. For this, the contact angle of contact was determined using the lying drop method.

Chemical modification of the graphite surface by reducing the diazonium salt significantly improves its wettability by aqueous solutions. Even in the case of pure water, the average value of the cosine of the contact angle is $\cos \theta = 0.65$, compared to $\cos \theta = 0.32$ for the unmodified surface. Solutions containing only hydrochloric acid are characterized by even higher values of $\cos \theta$, i.e., they wet the surface better compared to water, and much better compared to unmodified graphite. The addition of aniline to the solution initially leads to a decrease in $\cos \theta$, and a further increase in the aniline concentration is accompanied by a rapid increase in the cosine of the contact angle. The corresponding minimum is deepest for solutions with the lowest HCl concentration. For 0.1 N aniline in 0.5 N HCl, the value of $\cos \theta$ is the lowest of all those studied, but significantly higher than for pure water. With increasing acid concentration, the depth of the minimum decreases. Such results are due to the presence of aminophenyl groups capable of forming hydrogen bonds and protonation in the hydrochloric acid solution of aniline. As a result, an increase in the hydrophilicity of the surface and an increase in the work of adhesion are observed. The highest values of $\cos \theta$ and, accordingly, the best wettability of the modified surface are observed for concentrations of hydrochloric acid 1.0–2.0 N and aniline 1.0–2.0 N. The results obtained confirm the effectiveness of graphite surface modification by the method of diazo compound reduction and can be used in the synthesis of electrically conductive composites.

Keywords: graphite, surface tension, contact angle, aniline, adhesion, surface modification, wettability.

Актуальність проблеми. Формування стабільного міжфазного контакту та забезпечення адгезії між компонентами є важливими вимогами під час отримання композитних матеріалів на основі графіту та електропровідних полімерів. Покращення змочуваності графітових поверхонь розчинами солей аніліну призводить до покращення структури та властивостей таких матеріалів.

Тому модифікація поверхні вуглецевих є перспективним для створення нових гібридних матеріалів, у яких поєднуються висока

електропровідність, хімічна стабільність та механічна міцність (Dhand et al., 2011).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш універсальною формою вуглецю є графіт, завдяки високій електропровідності, здатністю утворювати різні морфології. У сучасних дослідженнях графіт використовується в енергетиці, електроніці та виготовлені електропровідних композитів (Murugan et al., 2021).

Розробка «expanded graphite» показала значний потенціал для застосування в суперконденсаторах, адже поєднує відмінні фізичні,

хімічні та електричні властивості, а також легку механічну будову (Zhang et al., 2022).

Сучасні дослідження демонструють, що модифікація графітових поверхонь арендіазонієвими солями дозволяє вводити нові функціональні групи. Такі сполуки значно покращують змочуваність та адгезію між компонентами.

Наприклад, показано, що модифікація арендіазонієвими солями підвищує кут змочування і зміцнює полімерне покриття на вуглецевих волокнах (Sun et al., 2024, р. 6–9).

Відновлення іонів арендіазонію супроводжується утворенням фенільних радикалів, які хімічно приєднуються до поверхні графіту. У цьому випадку привиті фенільні групи будуть орієнтовані під певним кутом до поверхні, що сприяє адсорбції, зокрема, аніліну. Під час полімеризації аніліну для створення кислотного середовища та допування поліаніліну зазвичай використовують соляну або сірчану кислоту (Konwer S., Pokhrel B, 2010; Wu X., Qi S., He J., Duan G., 2010; Konwer S., Gogoi J., Kalita A., Dolui S. 2011).

Використання діазосполук забезпечує формування стабільних ковалентних зв'язків, що сприяє підвищенню адгезії та контролю змочуваності, впливаючи на морфологію поліанілінових покриттів, синтезованих на таких поверхнях (Li et al., 2024, р. 4–7).

Графіт МПГ-7 належить до дрібнозернистих, високощільних графітів і призначений для роботи під значними механічними та термічними навантаженнями, а також в агресивних середовищах. Він виготовляється методом холодного пресування, що забезпечує високу щільність ($\sim 1,8 \text{ г/см}^3$) та низьку відкриту пористість, роблячи матеріал стійким до термічного та механічного руйнування. Дрібний розмір

зерен (не більше 25 мкм) дозволяє виготовляти деталі з тонкими ребрами, виступами та складними тонкостінними елементами (9).

Мета дослідження. Метою роботи було синтезувати 4-ацетамінофенілдіазоній тетрафторборат; провести модифікацію поверхні графіту МПГ-7 шляхом поміщення його у водно-ацетонітрильний розчин, в якому здійснювали процес відновлення діазосоли гіпофосфітом натрію; обробити поверхню кислотою з метою гідролізу привитих до поверхні ацетамінофенільних груп до амінофенільних та дослідити змочуваність такої поверхні розчинами аніліну в соляній кислоті.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для приготування розчинів використовували анілін (х.ч.), соляну кислоту (х.ч.), дистильовану воду. Готували вихідні розчини аніліну різних концентрацій у 3,0, 2,0, 1,0 та 0,5 н НСІ. Густина досліджуваних розчинів визначали пікнометричним методом, а їх поверхневий натяг – сталагмометричним методом.

Визначали крайовий кут змочування твердої поверхні графіту розчинами аніліну в соляній кислоті. В дослідженнях використовували метод лежачої краплі. На попередньо відшліфовану та очищену поверхню графіту наносили краплину розчину об'ємом 10 мкл. Проводили 5 паралельних вимірювань, поміщаючи краплину розчину на різні ділянки поверхні. Результати паралельних вимірів усереднювали. Проекцію краплі на підкладці фотографують. Висоту та ширину краплі визначають безпосередньо за фотознімком (рис. 1).

Значення косинуса крайового кута змочування обчислюють за формулою: $\cos \theta = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2}$, де d – ширина основи краплі, h – висота краплі.

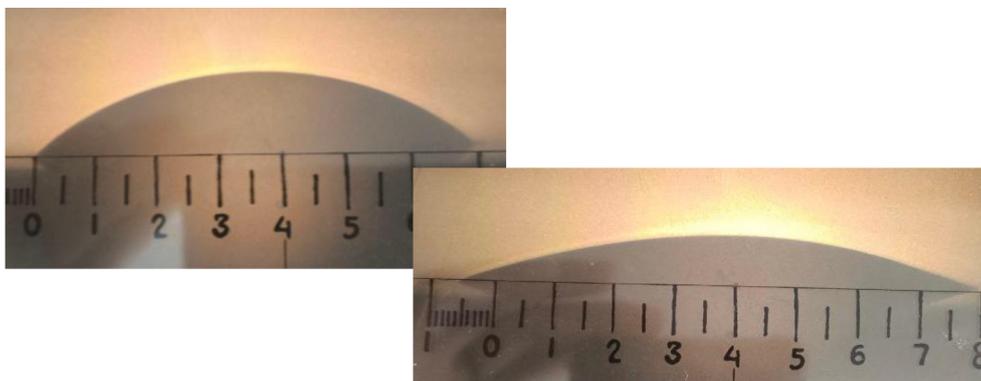


Рис. 1. До визначення крайового кута змочування розчинами солей аніліну графіту марки МПГ-7

Здійснили синтез 4-ацетамінофенілдіазоній тетрафторборату, провели модифікацію поверхні графіту шляхом занурення у 50 мл водного розчину, в якому відбувалось відновлення 3,25 г діазонієвої солі 1,5 г гіпофосфіту натрію. Для очищення поверхні від побічних продуктів реакції її багаторазово промивали по чергово етилацетатом та ацетонітрилом. Модифікований ацетамінофенільними групами графіт кип'ятили 30 хв в 10%-вому розчині соляної кислоти з метою гідролізу ацетамінових замісників до амінових.

Результати попередніх досліджень залежності поверхневих натягів розчинів від концентрації аніліну (змінювалась в межах від 0,00 до 2,00 н) та соляної кислоти (від 0,00 до 3,00 н) представлено у роботі (Ковалишин, Ловчицька, 2024). Дослідження змочуваності немодифікованої графітової поверхні відповідними розчинами представлено в роботі (Ковалишин, Ловчицька, 2023).

Для розчинів аніліну за достатнього надлишку соляної кислоти зі збільшенням концентрації аніліну спостерігається зменшення поверхневого натягу та покращення змочування поверхні графіту, що підтверджує тенденції, описані у сучасних роботах із поверхневої модифікації графенових та графітових матеріалів (Toledo-Carrillo E, 2024).

Варто зазначити, що навіть за відсутності аніліну для немодифікованого графіту наявність кислоти в розчині призводить до покращення змочуваності поверхні. Пояснити цей факт можна інтеркаляцією хлорид-іонів у поверхневі шари графіту. Відомо, що аніони, зокрема Cl^- , здатні проникати в міжшаровий простір графіту, змінюючи його поверхневу енергію та крайовий кут змочування. Така аніонна інтеркаляція супроводжується перебудовою електронної структури графітової поверхні та появою полярних центрів, що сприяє притягуванню молекул води (Paraderakis A. A., 2023). Найбільшою мірою цей ефект виявляється в 1 н HCl. Подальше збільшення концентрації кислоти призводить до погіршення змочуваності. Очевидно, в цьому випадку починають домінувати поверхнево-інактивні властивості розчинів соляної кислоти, зумовлені їх великим поверхневим натягом.

При додаванні аніліну спостерігається зростання $\cos\theta$, що вказує на покращення

змочування. Цей факт пояснюється з одного боку, поверхнево-активними властивостями розчинів солянокислого аніліну, тобто їх низьким поверхневим натягом. З іншого боку, на поверхні графіту відбуватиметься адсорбція катіона феніламонію. Очевидно, що фенільна група буде орієнтована в бік поверхні, а протонувана амінна група – в бік розчину. Наслідком буде поява електричних зарядів на поверхні, що теж сприятиме міжфазній взаємодії між твердою та рідкою фазами.

Модифікація поверхні графіту суттєво покращила її змочування. На рис. 2. представлено залежності $\cos\theta$ від концентрації аніліну в розчині за різних концентрацій соляної кислоти. Так, навіть у випадку чистої води середнє значення $\cos\theta = 0,65$ (порівняно з $\cos\theta = 0,32$ у випадку немодифікованої поверхні). Розчини, які містять лише соляну кислоту характеризуються ще більшими значеннями $\cos\theta$, тобто змочують поверхню краще порівняно з водою, і набагато краще порівняно з немодифікованим графітом. Отримані результати можна пояснити наявністю на поверхні прищеплених амінофенільних груп. Наявність аміногрупи сприятиме виникненню зв'язків з молекулами води. У випадку розчинів, що містять соляну кислоту, відбуватиметься протонування поверхневих аміногруп, що супроводжується набуттям ними позитивного електричного заряду. Наявність електричних зарядів на графітовій поверхні ще більшою мірою покращить взаємодію

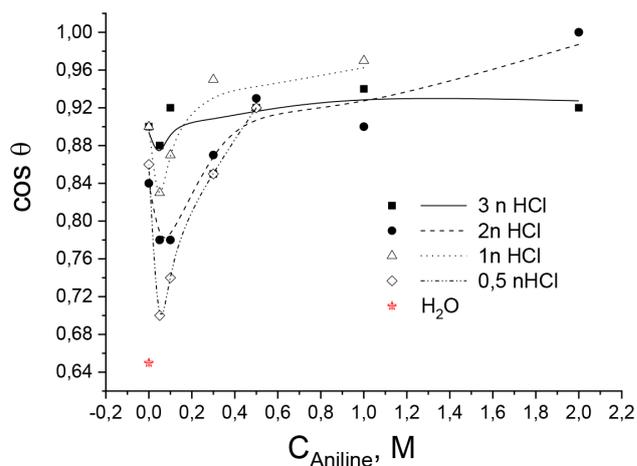


Рис. 2. Залежність косинуса крайового кута змочування від концентрацій аніліну та соляної кислоти у воді поверхні графіту МПГ-7 модифікованого у водно-ацетонітрильному розчині

з водними розчинами. Утворення заряду на поверхні графіту також може полегшити інтеркаляцію аніонів Cl^- у міжшаровий простір кристалічної решітки графіту.

Додавання до розчину аніліну концентрацією 0,1 н призводить до зменшення $\cos \theta$, причому це зменшення є найрізкішим для розчинів на основі 0,5 н HCl. Для 0,1 н аніліну в 0,5 н HCl значення $\cos \theta$ є найнижчим з усіх досліджених, але значно вищим, ніж для чистої води. Зі збільшенням концентрації кислоти спадання значень $\cos \theta$ зменшується і для розчинів, що містять 3 н HCl, відповідний мінімум є дуже слабо виражений. Оскільки поверхневий натяг розчинів та робота когезії (табл. 1) розчинів зменшуються зі збільшенням концентрації аніліну, то погіршення змочуваності зумовлене змінами властивостей поверхні. Пояснити отримані результати можна тим, що на поверхні будуть позитивно та негативно заряджені центри. Позитивними центрами будуть протоновані феніламініні групи. Негативними – полярні

центри, утворені внаслідок інтеркаляції аніонів Cl^- в міжшаровий простір графіту в тих областях поверхні, де відсутні прищеплені амінофенільні групи. При додаванні аніліну в розчин відбуватиметься адсорбція іонів феніламонію на негативних полярних центрах. При цьому гідрофобна фенільна група буде орієнтуватись в бік розчину, погіршуючи змочуваність поверхні.

В області з більшими концентраціями аніліну $\cos \theta$ швидко зростає і в області концентрацій 0,5–2,0 н перевищує початкові значення (за відсутності аніліну). Збільшення концентрації аніліну призводить до зменшення кількості вільної кислоти і, як наслідок, зменшення числа негативно заряджених полярних центрів на поверхні графіту. В результаті цього на незаряджених немодифікованих ділянках поверхні зміниться орієнтація адсорбованих іонів феніламонію, як і у випадку немодифікованого графіту змочування буде покращуватись внаслідок того, що

Таблиця 1

Залежність значень роботи адгезії та когезії від концентрацій аніліну та соляної кислоти у водних розчинах при змочуванні модифікованої поверхні графіту МПГ-7

Концентрація HCl, н	Концентрація аніліну, н	$W_{адгезії}$ Дж/м ²	$W_{когезії}$ Дж/м ²
3,0	2,0	0,107	0,111
3,0	1,0	0,113	0,116
3,0	0,5	0,131	0,136
3,0	0,3	0,125	0,135
3,0	0,1	0,131	0,136
3,0	0,05	0,132	0,140
3,0	0,0	0,131	0,138
2,0	2,0	0,126	0,126
2,0	1,0	0,124	0,130
2,0	0,5	0,123	0,127
2,0	0,3	0,121	0,190
2,0	0,1	0,115	0,129
2,0	0,05	0,115	0,129
2,0	0,00	0,127	0,138
1,0	1,0	0,126	0,128
1,0	0,5	0,131	0,136
1,0	0,3	0,137	0,140
1,0	0,1	0,136	0,145
1,0	0,05	0,136	0,149
1,0	0,00	0,133	0,140
0,5	0,5	0,131	0,136
0,5	0,3	0,126	0,136
0,5	0,1	0,117	0,135
0,5	0,05	0,116	0,136
0,5	0,00	0,132	0,142

вони орієнтуватимуться в бік розчину позитивно зарядженими протонуваними аміногрупами.

Найвищі значення i , відповідно, найкраще змочування поверхні спостерігається за концентрації соляної кислоти 1,0–2,0 н та аніліну 1,0–2,0 н. Для розчинів, що містять 3 н HCl, зміна концентрації аніліну слабо впливає на змочуваність поверхні, хоча значення $\cos \theta$ є доволі високими і перебувають в межах 0,92–0,94.

Отримані результати корелюють з розрахованими значеннями робіт адгезії та когезії (табл. 1). Найбільші значення робіт адгезії спостерігаються для 1,0 н та 3,0 н розчинів соляної кислоти.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі досліджено змочування поверхні графіту МПГ-7 водними розчинами солей аніліну та вплив хімічної модифікації графіту на його поверхневі властивості.

Хімічна модифікація графіту через відновлення діазонієвої солі суттєво покращує його змочуваність водними розчинами. На поверхні

з'являються амінофенільні групи, здатні до утворення водневих зв'язків і протонування в кислому середовищі, що зумовлює підвищення гідрофільності та збільшення роботи адгезії.

Найвищі значення $\cos \theta$ i , відповідно, найкраща змочуваність модифікованої поверхні спостерігаються для соляної кислоти 1,0–2,0 н та аніліну 1,0–2,0 н. Отримані результати підтверджують ефективність модифікації графітової поверхні методом відновлення діазосполук та можуть бути використані для розробки електропровідних композитів і гібридних вуглецево-полімерних матеріалів із покращеною міжфазною взаємодією.

Подяка. Подані у цій статті результати досліджень отримано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації держбюджетної теми: 0123U101857 «Фізико-хімія функціональних наноматеріалів для електрохімічних систем»).

This work was partly supported by the Simons Foundation (Award Number: PD-Ukraine-00014574).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Dhand C., Dwivedi N., Malhotra B. Polyaniline-based biosensors. *Nanobiosensors in Disease Diagnosis*. 2011. 26, 2811–2821. DOI: 10.2147/NDD.S64841
2. Murugan P., Nagarajan R., Shetty B., Govindasamy M., Sundramoorthy A. Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors – a review. *Nanoscale Advances*. 2021. 6294. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1NA00109D>
3. Zhang D., Tan C., Zhang W., Pan W., Wang Q., Li L. Expanded Graphite-Based Materials for Supercapacitors: A Review. *Molecules*. 2022. 27. 716. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27030716>
4. Sun M., Li X., Liu H., Huang C., Wang K., & Zhao Y. Effect of Electrochemical Aryl Diazonium Salt Modification on Interfacial Properties of CF/PEEK Composites. *Materials*. 2024. 17. 2899. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17122899>
5. Konwer S., Pokhrel B., Dolui S. K. Synthesis and Characterization of Polyaniline/Graphite Composites and Study of Their Electrical and Electrochemical Properties. *Applied Polymer Science*. 2010. 1138–1145. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.31633>
6. Wu X., Qi S., He J., Duan G. Polyaniline/Graphite Nanosheets Composites and its Conducting Properties. *Polymers & Polymer Composites*. 2010. Vol. 18. 23–29. DOI: 10.1177/096739111001800103
7. Konwer S., Gogoi J., Kalita A., Dolui S. Synthesis of expanded graphite filled polyaniline composites and evaluation of their electrical and electrochemical properties. *Mater Electron*. 2011. DOI: 10.1007/s10854-010-0276-7
8. Li W., Duan Z., Sun M., et al. Grafting Carbon Fibers with Graphene via a One-Pot Aryl Diazonium Reaction to Refine the Interface Performance of T1100-Grade CF/BMI Composites. *Materials*. 2024. 17. 3288. DOI: 10.3390/ma17133288
9. Graphite. URL: <https://graphite.in.ua/ua/p115810-grafit-mpg.html>
10. Ковалишин Я., Ловчицька В. Дослідження змочування поверхні графіту МПГ-7 водними розчинами солей аніліну. *Вісн. Львів. у-ту. Сер. хімічна*. 2024. 65. С. 335–343. DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/vch.6501.335>
11. Ловчицька В., Ковалишин Я. Змочування поверхні графіту розчинами аніліну в соляній кислоті. *Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології*. 2023. 83–85.
12. Toledo-Carrillo E., Garcia-Rodriguez M., Morallon E., Cazorla-Amoros D., Ye F. Co-complexes on modified graphite surface for steady green hydrogen production from water at neutral pH. *Frontiers in Chem*. 2024. 1–11. DOI: 10.3389/fchem.2024.1469804
13. Papaderakis A. A., Ejigu A., Yang J., Elgendy A., Radha B., Keerthi A., Juel A., Dryfe R. A. W. Anion intercalation into graphite drives surface wetting. *J. Am. Chem. Soc*. 2023. Vol. 145. 8007–8020. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.2c13630>

REFERENCES:

1. Dhand, C., Dwivedi, N., & Malhotra, B. (2011). Polyaniline-based biosensors. *Nanobiosensors in Disease Diagnosis*, 26, 2811–2821. <https://doi.org/10.2147/NDD.S64841>
2. Murugan, P., Nagarajan, R., Shetty, B., Govindasamy, M., & Sundramoorthy, A. (2021). Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors: A review. *Nanoscale Advances*, 3, 6294–6314. <https://doi.org/10.1039/D1NA00109D>
3. Zhang, D., Tan, C., Zhang, W., Pan, W., Wang, Q., & Li, L. (2022). Expanded graphite-based materials for supercapacitors: A review. *Molecules*, 27(3), Article 716. <https://doi.org/10.3390/molecules27030716>
4. Sun, M., Li, X., Liu, H., Huang, C., Wang, K., & Zhao, Y. (2024). Effect of electrochemical aryl diazonium salt modification on interfacial properties of CF/PEEK composites. *Materials*, 17(12), Article 2899. <https://doi.org/10.3390/ma17122899>
5. Konwer, S., Pokhrel, B., & Dolui, S. K. (2010). Synthesis and characterization of polyaniline/graphite composites and study of their electrical and electrochemical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(2), 1138–1145. <https://doi.org/10.1002/app.31633>
6. Wu, X., Qi, S., He, J., & Duan, G. (2010). Polyaniline/graphite nanosheets composites and its conducting properties. *Polymers & Polymer Composites*, 18(1), 23–29. <https://doi.org/10.1177/096739111001800103>
7. Konwer, S., Gogoi, J., Kalita, A., & Dolui, S. K. (2011). Synthesis of expanded graphite filled polyaniline composites and evaluation of their electrical and electrochemical properties. *Materials Science in Electronics*. <https://doi.org/10.1007/s10854-010-0276-7>
8. Li, W., Duan, Z., Sun, M., et al. (2024). Grafting carbon fibers with graphene via a one-pot aryl diazonium reaction to refine the interface performance of T1100-grade CF/BMI composites. *Materials*, 17(13), Article 3288. <https://doi.org/10.3390/ma17133288>
9. Graphite. (n.d.). *Hrafit MPG* [Graphite MPG]. Retrieved from <https://graphite.in.ua/ua/p115810-grafit-mpg.html>
10. Kovalyshyn, Y., & Lovchytska, V. (2024). *Doslidzhennia zmochuvannia poverkhni hrafitu MPH-7 vodnymy rozchynamy solei anilinu* [Study of wetting of MPG-7 graphite surface by aqueous solutions of aniline salts]. *Visnyk of Lviv University. Chemical Series*, 65, 335–343. <https://doi.org/10.30970/vch.6501.335> [in Ukrainian].
11. Lovchytska, V., & Kovalyshyn, Y. (2023). *Zmochuvannia poverkhni hrafitu rozchynamy anilinu v solianii kysloti* [Wetting of graphite surface by aniline solutions in hydrochloric acid]. *Current Problems of Chemistry, Materials Science and Ecology*, 83–85. [in Ukrainian].
12. Toledo-Carrillo, E., Garcia-Rodriguez, M., Morallon, E., Cazorla-Amoros, D., & Ye, F. (2024). Co-complexes on modified graphite surface for steady green hydrogen production from water at neutral pH. *Frontiers in Chemistry*, 12, Article 1469804. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1469804>
13. Papaderakis, A. A., Ejigu, A., Yang, J., Elgendy, A., Radha, B., Keerthi, A., Juel, A., & Dryfe, R. A. W. (2023). Anion intercalation into graphite drives surface wetting. *Journal of the American Chemical Society*, 145(14), 8007–8020. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c13630>

Стаття надійшла: 25.11.2025

Прийнято: 13.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025