

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.3.4>

Received: 28.04.2026
Revised: 19.05.2026
Accepted: 29.05.2026
Published: 29.05.2026

Володимир ХОМЕНКО, Дмитро НІКУЛІН,
Оксана БУТЕНКО, Владислав ХОМЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

УДК 621.355.8:
544.6:661.666.2

ОДЕРЖАННЯ ВИСОКОЧИСТОГО СФЕРОДИЗОВАНОГО ГРАФІТУ ДЛЯ АНОДІВ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Мета. Визначення та обґрунтування послідовності технологічних стадій одержання сферичного графіту для анодів літій-іонних акумуляторів, яка забезпечує мінімізацію втрат високочистого матеріалу під час сферонізації та дозволяє досягнути чистоти понад 99,95 мас.% на етапі доочищення без порушення морфології частинок і погіршення їхніх електрохімічних характеристик.

Методика. Дослідження виконано із використанням зразків сферодизованого графіту, одержаного з природного графіту марки GAK-2. Хімічне очищення сферодизованого матеріалу проводили розчином сульфатної кислоти з додаванням амоній фториду. Хімічну чистоту графіту визначали методом озолення у муфельній печі за температури 1050 °С та рентгенофлуоресцентним аналізом золи із використанням спектрометра Oxford Instruments X-Supreme 8000. Електрохімічні випробування графітових матеріалів здійснювали у двоелектродних комірках із літєвим електродом із використанням 32-канального приладу MSTAT ARBIN.

Результати. Встановлено, що запропонований метод хімічного очищення сферодизованого графіту забезпечує одержання анодного матеріалу з чистотою понад 99,95 % при збереженні сферичної морфології частинок. Електрохімічні дослідження підтвердили високу стабільність отриманих матеріалів, зокрема досягнення питомої ємності на рівні 365 мА·год/г при тривалому циклуванні.

Наукова новизна. Підтверджено ефективність запропонованої технологічної схеми одержання анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів, яка передбачає сферонізацію графіту з низькою чистотою з подальшим хімічним доочищенням сферодизованого матеріалу. Вперше показано можливість ефективного очищення сферодизованого графіту із використанням розбавленого розчину сульфатної кислоти з додаванням амоній фториду.

Практична значимість. Запропонований технологічний підхід до одержання сферичного графіту забезпечує зниження втрат високочистого графіту на стадії сферонізації та сприяє більш ефективному використанню графітової сировини у виробництві анодних матеріалів для літій-іонних акумуляторів.

Ключові слова: природний графіт; сферичний графіт; анодні матеріали літій-іонних акумуляторів; хімічне очищення; проєктування процесів очищення графіту.

Вступ. Природний графіт залишається основним анодним матеріалом для літій-іонних акумуляторів (ЛІА) завдяки поєднанню високої оборотної ємності, хімічної стабільності та відносно низької вартості [1, 2]. Для використання в анодах ЛІА графіт повинен мати чистоту не менше 99,95 мас. %, оскільки навіть незначний вміст мінеральних домішок може негативно впливати на стабільність циклування та безпечність елементів живлення [3]. Найбільш економічно доступним способом одержання графіту є флотаційне збагачення, однак чистота такого матеріалу зазвичай обмежується рівнем 95–98 мас. % через наявність силікатних і металовмісних домішок [4]. Подальше очищення графіту потребує застосування енергоємного термічного очищення або хімічної обробки з використанням насамперед фторводневої кислоти. Це супроводжується суттєвим зростанням загальної собівартості графітового матеріалу [3, 4]. Важливим етапом виробництва анодного матеріалу є сферонізація графіту, під час якої пластинчасті частинки природного графіту трансформуються у сферичні або квазісферичні структури. Формування сферичної морфології забезпечує підвищення насипної густини матеріалу, покращення ущільнення електрода та зростання енергоємності ЛІА в цілому [1, 5]. Водночас процес сферонізації характеризується низьким виходом цільового

продукту. За даними експериментальних і технологічних досліджень [5], вихід сферичного графіту зазвичай становить лише 40–60%, тоді як інша частина матеріалу переходить у дрібнодисперсні фракції, що мають обмежене практичне застосування. За таких умов критично важливим технологічним питанням є вибір оптимальної послідовності стадій очищення та сферонізації графіту. Проведення сферонізації високочистого графіту (> 99,95 мас. %) є економічно недоцільним, оскільки значна частина очищеного матеріалу втрачається під час формування сферичних частинок. Водночас використання для сферонізації графіту з чистотою 95–98 мас. % також є недоцільним. У цьому випадку мінеральні домішки можуть інкапсулюватися всередині сформованих сферичних частинок, що ускладнює подальше очищення, збільшує витрати реагентів та створює ризик часткового руйнування сферичної морфології під час інтенсивної кислотної або термічної обробки [6–8].

У даній роботі запропоновано інноваційний технологічний підхід, який передбачає проведення сферонізації графіту після його первинного хімічного очищення, що забезпечує чистоту на рівні 99,1–99,5 мас. %. Подальше доочищення до рівня > 99,95 мас. % було здійснено вже для сферодизованого графітового матеріалу. Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати високочистого графіту та підвищити ефективність виробництва анодних матеріалів для ЛІА.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення та обґрунтування послідовності технологічних стадій одержання сферичного графіту для анодів літій-іонних акумуляторів, яка забезпечує мінімізацію втрат високочистого матеріалу під час сферонізації та дозволяє досягнути чистоти понад 99,95 мас. % на етапі доочищення без порушення морфології частинок і погіршення їхніх електрохімічних характеристик.

Результати дослідження. Для проведення сферонізації було використано природний графіт марки GAK-2 виробництва Заваллівський графітовий комбінат. Використання даної марки обумовлене відповідністю її гранулометричних характеристик вимогам процесу механічної сферонізації графіту для анодних матеріалів ЛІА. За даними авторів роботи [5], ефективно формування сферичного графіту досягається після попереднього подрібнення природного лускатого графіту до $d_{50} \approx 20$ мкм та $d_{90} \approx 37$ мкм. Сферонізація природного графіту забезпечує формування вузького гранулометричного розподілу та дозволяє отримувати сферичний графіт із виходом 35–55%.

У даній роботі сферонізацію графіту GAK-2 було виконано компанією NETZSCH Trockenmahltechnik GmbH із отриманням сферодизованих фракцій із характерним розміром частинок 10 та 15 мкм. Ефективність процесу становила близько 40%. Визначення гранулометричного складу отриманих сферодизованих зразків графіту проводиться методом лазерної дифракції із використанням аналізатора розмірів частинок – Bettersizer 2600 (Bettersize Instruments). Результати дослідження гранулометричного складу зразків графіту наведені на рис. 1 та у таблиці 1. Для характеристики розподілу частинок за розмірами використовували параметри D10, D50 та D90, які відповідають розмірам частинок, нижче яких знаходиться відповідно 10, 50 та 90% об'єму матеріалу. Для оцінки ширини гранулометричного розподілу визначали коефіцієнт полідисперсності гранулометричного складу $(D_{90}-D_{10})/D_{50}$.

Встановлено, що зразок №1 характеризується медіанним розміром частинок $D_{50} = 10,7$ мкм та відносно вузьким гранулометричним розподілом із коефіцієнтом полідисперсності 1,0. Значення D10 та D90 для даного зразка становили 6,2 та 17,1 мкм відповідно, що свідчить про обмежений вміст як дрібнодисперсних, так і крупних фракцій.

Для зразка №2 спостерігалось зміщення гранулометричного розподілу в область більших розмірів частинок. Значення D50 становило 14,0 мкм, тоді як D90 досягало 25,7 мкм. При цьому коефіцієнт полідисперсності зростав до 1,3, що вказує на формування більш широкого гранулометричного розподілу та збільшення частки крупнодисперсних фракцій у матеріалі.

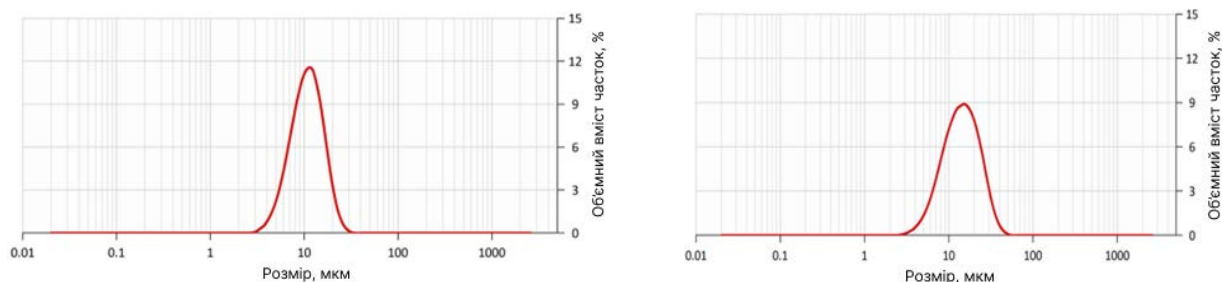


Рис. 1. Гранулометричний склад зразка № 1 (ліворуч) та зразка № 2 (праворуч)

Таблиця 1

Результати дослідження гранулометричного складу зразків графіту

Зразок	D10, мкм	D50, мкм	D90, мкм	(D90 – D10)/D50	Розподіл
Зразок № 1	6,2	10,7	17,1	1,0	відносно вузький
Зразок № 2	7,1	14,0	25,7	1,3	широкий

Отримані результати свідчать, що зразок № 1 характеризується більш однорідним гранулометричним складом, тоді як для зразка № 2 характерний ширший розподіл частинок за розмірами. Водночас для анодного графіту надмірно вузький гранулометричний розподіл не завжди є оптимальним. У комерційних анодних матеріалах для ЛІА часто використовують бімодальний або помірно широкий розподіл частинок, оскільки наявність дрібнодисперсної фракції забезпечує заповнення пор між більшими частинками, що сприяє підвищенню насипної густини та покращенню ущільнення електродного шару.

Хімічне доочищення сферодизованого графіту (зразки № 1 та № 2) проводили із використанням методики, розробленої в межах міжнародного проекту 101103752-GR4FITE3 програми «Горизонт Європа». У роботах [9, 10] наведені розроблені методи очищення графіту розбавленими розчинами сульфатної кислоти у присутності підібраної кількості амоній фториду з урахуванням зольності матеріалу та його хімічного складу. Концентрація NH_4F у реакційному середовищі не перевищувала 6 г/л, що суттєво нижче кількостей, необхідних для стехіометричного зв'язування всіх кремнійвмісних домішок. Основна частина мінеральних домішок природного графіту представлена алюмосилікатними та оксидними фазами. У присутності сульфатної кислоти HF взаємодіє передусім із кремній- та алюмініївмісними компонентами домішок. При цьому відбувається часткове руйнування алюмосилікатного каркасу з утворенням розчинних фторсилікатних та фторалюмінатних комплексів, що суттєво полегшує подальше розчинення мінеральних фаз у розбавленій сульфатній кислоті. Таким чином, NH_4F у даній системі виконує функцію активатора руйнування силікатних домішок, а не реагента для повного стехіометричного зв'язування кремнію. Це дозволяє суттєво обмежити використання фторвмісних реагентів та зменшити екологічні ризики процесу хімічного очищення.

Згідно з даними попередніх досліджень [9, 10], графіт GAK-2 характеризується вмістом карбону 99,19% та зольністю 0,81%. Основними домішками графіту є Fe, Si, Al, Ca, Ti, Cr та Ni. Оскільки сферонізація є механічним процесом, який не супроводжується зміною фазового або хімічного складу графіту, сферодизовані зразки № 1 та № 2 характеризувалися аналогічним типом домішок, притаманним вихідному графіту GAK-2.

У роботі було проведено порівняльний хімічний аналіз очищених сферодизованих зразків графіту та двох комерційних анодних графітів методом рентгено-флуоресцентного аналізу із використанням спектрометра Oxford Instruments X-Supreme 800, Велика Британія. Ефективність хімічного доочищення оцінювали за результатами хімічного аналізу зольного залишку. Порівняння двох сферодизованих фракцій показало, що для зразка № 2 з характерним розміром частинок 15 мкм досягнуто вищого ступеня очищення порівняно зі

зразком № 1 (10 мкм). Зокрема, для фракції 15 мкм вміст вуглецю становив 99,97%, тоді як для фракції 10 мкм – 99,95%. Крім того, для зразка № 2 спостерігались нижчі концентрації SiO_2 та Fe_2O_3 , які є основними залишковими домішками у сферодизованому графіті. Ймовірно, нижча ефективність очищення дрібнодисперсної фракції пов'язана з особливостями процесу сферонізації. Під час формування сферичних частинок частина мінеральних домішок може інкапсулюватися всередині графітових агломератів, що ускладнює їх контакт із кислотним розчином під час хімічної обробки. Для фракції 10 мкм цей ефект може проявлятися більшою мірою через вищу інтенсивність механічної обробки.

Отримані результати (таблиця 2) свідчать, що розроблений метод очищення забезпечує рівень чистоти, співставний із комерційними анодними графітами.

Таблиця 2

Хімічний аналіз зразків графіту

Оксидні домішки	Вміст оксидних домішок у графіті, мг/кг (ppm)			
	Зразок № 1	Зразок № 2	Комерційний зразок № 1	Комерційний зразок № 2
NaO	5,6	4,1	20,9	50,9
Al ₂ O ₃	3,0	4,7	6,1	5,8
SiO ₂	119,0	73,5	69,0	106,9
K ₂ O	0,3	1,2	0,2	0,3
CaO	34,9	13,7	11,8	44,6
TiO ₂	3,6	2,4	7,6	22,0
V ₂ O ₅	0,2	0,3	1,7	21,5
Cr ₂ O ₃	12,2	14,8	2,2	3,3
MnO ₂	2,3	1,9	0,7	3,6
Fe ₂ O ₃	99,7	69,6	78,0	95,2
CoO	1,4	1,2	1,3	1,9
NiO	8,6	6,3	2,7	7,2
CuO	0,6	0,8	0,2	0,5
ZnO	0,9	4,1	0,8	1,1

Основними залишковими домішками у всіх досліджуваних зразках були сполуки кремнію та заліза. Для сферодизованого графіту вміст SiO_2 становив 119,0 ppm для фракції 10 мкм та 73,5 ppm для фракції 15 мкм, тоді як концентрація Fe_2O_3 знаходилась у межах 69,6–99,7 ppm. Аналогічні концентрації SiO_2 та Fe_2O_3 спостерігались і для комерційних анодних графітів. Слід відзначити, що сферодизовані зразки після очищення характеризувалися низьким вмістом Al_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 та MnO_2 . Таким чином, результати рентгенофлуоресцентного аналізу підтверджують високу ефективність запропонованого методу хімічного доочищення сферодизованого графіту. Отримані зразки характеризуються низьким вмістом критичних домішок та рівнем чистоти, достатнім для використання як анодного матеріалу ЛІА.

У роботі було проведено дослідження морфології очищеного сферодизованого графіту методом скануючої електронної мікроскопії (скануючий електронний мікроскоп ZEISS Gemini SEM 500, Німеччина). Мікроструктура матеріалу після хімічної обробки наведена на рис. 2. Отримані результати підтверджують, що після кислотного доочищення сферодизований графіт зберігає сформовану сферичну морфологію частинок без суттєвого руйнування поверхні або деструкції сферичних агломератів. Це свідчить про можливість використання розробленого методу хімічного очищення без погіршення морфологічних характеристик сферичного графіту.

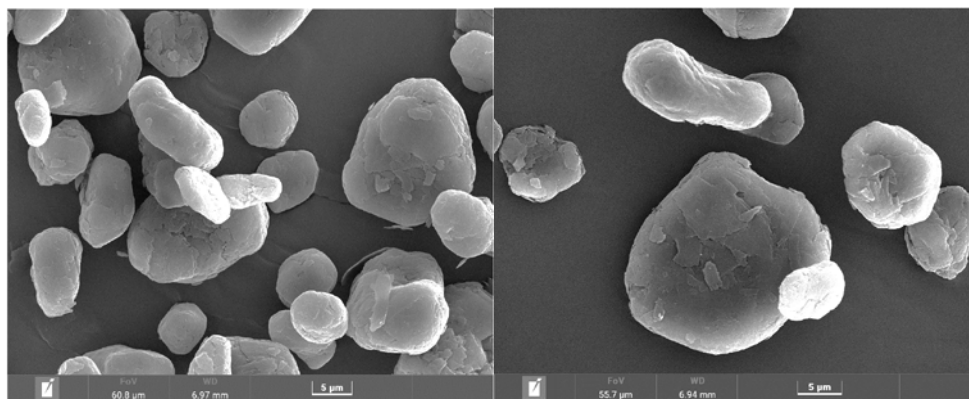


Рис. 2. Мікроструктура зразка № 1 (ліворуч) та зразка № 2 (праворуч) після кислотного доочищення

Електрохімічні характеристики очищеного сферодизованого графіту досліджували з метою оцінки можливості його використання як анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів. Випробування проводили для двох фракцій сферичного графіту з характерним розміром частинок 10 та 15 мкм, очищених із використанням розбавленого розчину сульфатної кислоти. На рис. 3 наведено типові гальваностатичні криві електродів на основі очищеного сферодизованого графіту. Електрохімічні дослідження проводили у напівкомірках Li/графіт у діапазоні потенціалів 0,01–2,0 В при густині струму $C/10$. Для обох зразків характерна типова для графіту форма зарядно-розрядних кривих із вираженим плато в області низьких потенціалів, що відповідає процесам інтеркаляції та деінтеркаляції літію у графітову структуру. Формування плато в області 0,1–0,2 В свідчить про утворення стадійованих сполук літію типу LiC_6 та підтверджує збереження впорядкованої кристалічної структури графіту після сферонізації та хімічного очищення. Питома ємність досліджених матеріалів знаходилась у межах 362–365 мА·год/г, що є близьким до теоретичної ємності графіту (372 мА·год/г). Необоротна втрата ємності у першому циклі становила близько 10,4%, що свідчить про якісне формування пасивного міжфазного шару (SEI). Обидва сферодизовані зразки продемонстрували близькі значення питомої ємності та кулонівської ефективності.

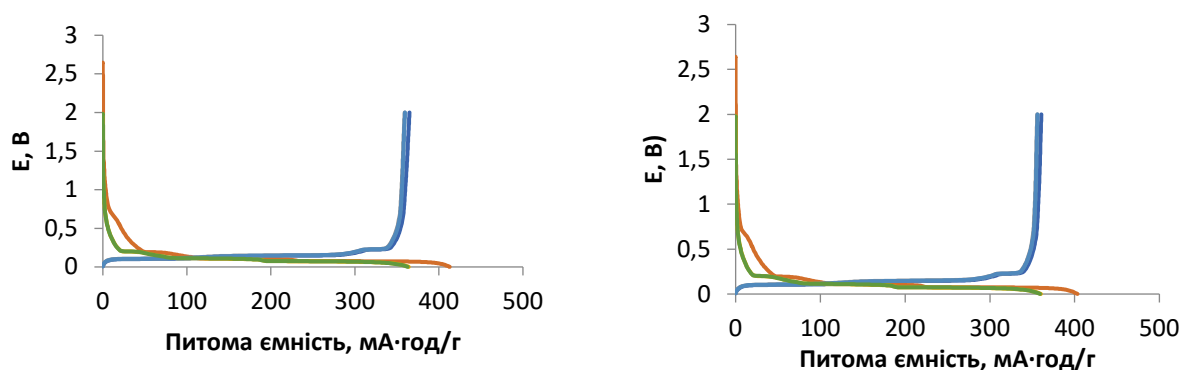


Рис. 3. Гальваностатичні заряд/розрядні криві електродів на основі зразка № 1 (ліворуч) та зразка № 2 (праворуч)

На рис. 4 наведено зміну питомої ємності сферодизованого графіту під час тривалого циклування. Для обох зразків після першого циклу спостерігалася стабілізація ємності на рівні близько 360 мА·год/г без суттєвого зниження протягом 100 циклів.

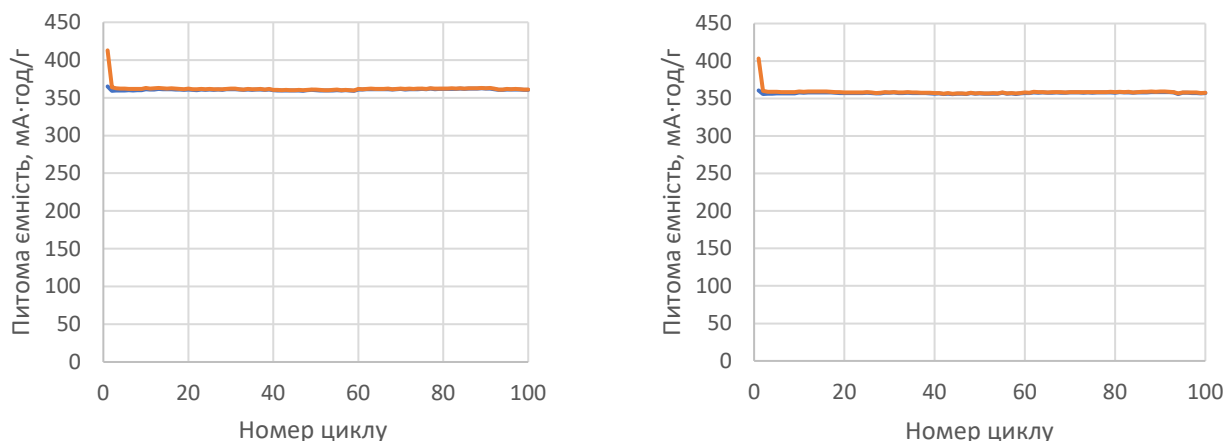


Рис. 4. Зміна питомої ємності сферодизованого графіту (зразок № 1-ліворуч, зразок № 2-праворуч) під час тривалого гальваностатичного циклування

Отримані результати свідчать про високу стабільність процесів інтеркаляції та деінтеркаляції літію, а також про формування стабільного міжфазного шару на поверхні графіту. Відсутність помітної деградації ємності під час циклування підтверджує високу структурну стабільність очищеного сферичного графіту.

Висновки. Запропоновано підхід до одержання високочистого сферичного графіту для анодів літій-іонних акумуляторів шляхом поєднання сферонізації та подальшого хімічного доочищення у розбавленому розчині H_2SO_4 з додаванням NH_4F . Встановлено, що після очищення сферодизований графіт зберігає сферичну морфологію та характеризується чистотою 99,95–99,97%. Електрохімічні дослідження показали високу стабільність матеріалів при циклуванні та досягнення питомої ємності 365 мА·год/г при необоротній втраті ємності близько 10,4%. Отримані результати підтверджують перспективність використання очищеного сферичного графіту як анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів.

Подяка. Робота виконується за фінансовою підтримкою проекту ЄС 101103752-GR4FITE «Стийке постачання графіту для анодів літій-іонних акумуляторів завдяки сталому розвитку європейського ланцюга постачання» програми «Горизонт Європа».

References

1. Asenbauer, J., Eisenmann, T., Kuenzel, M., Kazzazi, A., Chen, Z., & Bresser, D. (2020). The success story of graphite as a lithium-ion anode material – Fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(11), 5387–5416. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0SE00175A>.
2. International Energy Agency (2022). Global supply chains of EV batteries. IEA Publications. URL: <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>.
3. Jara, A. D., Betemariam, A., Woldetinsae, G., & Kim, J. Y. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5), 671–689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.

Література

1. Asenbauer J., Eisenmann T., Kuenzel M., Kazzazi A., Chen Z., Bresser D. The success story of graphite as a lithium-ion anode material – Fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. *Sustainable Energy & Fuels*. 2020. Vol. 4, No. 11. P. 5387–5416. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0SE00175A>.
2. Global supply chains of EV batteries. IEA Publications. *International Energy Agency*. 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>.
3. Jara A. D., Betemariam A., Woldetinsae G., Kim J. Y. Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, No. 5. P. 671–689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.

4. Jara, A. D., & Kim, J. Y. (2020). Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion battery anodes. *Materials Today Communications*, (25), 101437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.
5. Fischer, S., Doose, S., Müller, J., Höfels, C., & Kwade, A. (2023). Impact of spheroidization of natural graphite on fast-charging capability of anodes for lithium-ion batteries. *Batteries*, 9(6), 305. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9060305>.
6. Mundszinger, M., Farsi, S., Rapp, M., Golla-Schindler, U., Kaiser, U., & Wachtler, M. (2017). Morphology and texture of spheroidized natural and synthetic graphites. *Carbon*, (111), 764–773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.10.060>.
7. Vu, T. T., La, D. D., Le, L. V., Pham, T. K., Nguyen, M. A., Nguyen, T. H., Dang, T. D., Um, M.-J., Chung, W., & Nguyen, D. D. (2024). Purification of spherical graphite as anode for Li-ion battery: A comparative study on the purifying approaches. *Micromachines*, 15(7), 827. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15070827>.
8. Dong, H., Qiu, Y., Mai, Y., Liu, J., You, D., & Sun, K. (2024). Quantifying the impurity distribution in spherical graphite: The limitation of flotation for graphite purification explained. *Minerals*, 14(12), 1187. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14121187>.
9. Makieieva, I. S., Kyslova, O. V., Patlun, D. V., Khomenko, V. H., & Nikulin, D. O. (2024). Rozrobka metodiv pidvyshchennia efektyvnosti khimichnoho ochyshchennia pryrodnoho hrafitu [Development of methods for increasing the efficiency of chemical purification of natural graphite]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh*, 2(19), 117–124. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.11> [in Ukrainian].
10. Khomenko, V. H., Makieieva, I. S., Kyslova, O. V., & Nikulin, D. O. (2025). Rozrobka efektyvnoi khimichnoi tekhnolohii ochyshchennia hrafitu dlia anodiv litiionnykh akumulatoriv [Development of an effective chemical purification technology of graphite for lithium-ion battery anodes]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 2(40), 354–361. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-354-361](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-354-361) [in Ukrainian].
4. Jara A. D., Kim J. Y. Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion battery anodes. *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 25. Art. 101437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.
5. Fischer, S., Doose, S., Müller, J., Höfels, C., Kwade, A. Impact of spheroidization of natural graphite on fast-charging capability of anodes for lithium-ion batteries. *Batteries*. 2023. Vol. 9, No. 6. Art. 305. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9060305>.
6. Mundszinger M., Farsi S., Rapp M., Golla-Schindler U., Kaiser U., Wachtler M. Morphology and texture of spheroidized natural and synthetic graphites. *Carbon*. 2017. Vol. 111. P. 764–773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.10.060>.
7. Vu T. T., La D. D., Le L. V., Pham T. K., Nguyen M. A., Nguyen T. H., Dang T. D., Um M.-J., Chung W., Nguyen D. D. Purification of spherical graphite as anode for Li-ion battery: A comparative study on the purifying approaches. *Micromachines*. 2024. Vol. 15, No. 7. Art. 827. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15070827>.
8. Dong H., Qiu Y., Mai Y., Liu J., You D., Sun K. Quantifying the impurity distribution in spherical graphite: The limitation of flotation for graphite purification explained. *Minerals*. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 1187. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14121187>.
9. Макеєва І. С., Кислова О. В., Патлун Д. В., Хоменко В. Г., Нікулін Д. О. Розробка методів підвищення ефективності хімічного очищення природного графіту. *Технології та інженіринг*. 2024. № 2 (19). С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.11>.
10. Хоменко В. Г., Макеєва І. С., Кислова О. В., Нікулін Д. О. Розробка ефективної хімічної технології очищення графіту для анодів літій-іонних акумуляторів. *Технічні науки та технології*. 2025. № 2 (40). С. 354–361. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-354-361](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-354-361).

KHOMENKO VOLODYMYR

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>

Scopus Author ID: 7004402598

Researcher ID: X-2214-2018

E-mail: v.khomenko@i.ua

NICULIN DMYTRO

Postgraduate student, Department of Chemical
Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0001-7063-2826>

E-mail: nikulin74@gmail.com

BUTENKO OKSANA

PhD, Senior Lecturer, Department of Chemical
Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-4513-3355>
Scopus Author ID: 57207988484
ResearcherID: AAH-4024-2019
E-mail: butenko.oo@knutd.com.ua

KHOMENKO VLADYSLAV

Student of the Department of Chemical
Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: khomenko_vladyslav@gmail.com

Volodymyr KHOMENKO, Dmytro NIKULIN, Oksana BUTENKO, Vladyslav KHOMENKO

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**PRODUCTION OF HIGH-PURITY SPHERONIZED GRAPHITE
FOR LITHIUM-ION BATTERY ANODES**

Purpose. Determination and justification of the sequence of process stages for the production of spherical graphite for lithium-ion battery anodes, which ensures the minimisation of losses of high-purity material during spheronization and enables a purity of over 99.95% by mass to be achieved during the post-purification stage without altering the particle morphology or impairing their electrochemical characteristics.

Methodology. The study was carried out using samples of spheronized graphite obtained from natural graphite of the GAK-2 grade. Chemical purification of the spheronized material was performed using a sulphuric acid solution with the addition of ammonium fluoride. The chemical purity of the graphite was determined by ashing in a muffle furnace at 1050 °C followed by X-ray fluorescence analysis of the ash using an Oxford Instruments X-Supreme 8000 spectrometer. Electrochemical testing of the graphite materials was conducted in two-electrode cells with lithium counter electrodes using a 32-channel MSTAT ARBIN system.

Findings. It was established that the proposed chemical purification method for spheronized graphite enables the production of an anode material with a purity exceeding 99.95% while preserving the spherical morphology of the particles. Electrochemical studies confirmed the high stability of the obtained materials, including the achievement of a specific capacity of 365 mAh g⁻¹ during prolonged cycling.

Originality. The effectiveness of the proposed technological route for producing graphite anode materials for lithium-ion batteries has been demonstrated. The approach involves the spheronization of partially purified graphite followed by chemical post-purification of the spheronized material. For the first time, the possibility of efficient purification of spheronized graphite using dilute sulphuric acid solutions with the addition of ammonium fluoride has been demonstrated.

Practical value. The proposed technological approach to spherical graphite production reduces losses of high-purity graphite during the spheronization stage and promotes more efficient utilisation of graphite raw materials in the manufacture of anode materials for lithium-ion batteries.

Keywords: natural graphite; spherical graphite; lithium-ion batteries; graphite anodes; chemical purification; spheronization.