

**Володимир Григорович Хоменко<sup>1</sup>, Ірина Сергіївна Макєєва<sup>2</sup>,  
Ольга Володимирівна Кислова<sup>3</sup>, Дмитро Олександрович Нікулін<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [v.khomenko@i.ua](mailto:v.khomenko@i.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>  
Researcher ID: X-2214-2018. SCOPUS Author ID: 7004402598

<sup>2</sup>кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [makyeveva.is@kntud.com.ua](mailto:makyeveva.is@kntud.com.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>  
Researcher ID: X-2580-2018. SCOPUS Author ID: 7003994762

<sup>3</sup>кандидат біологічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [kislova.ov@kntud.com.ua](mailto:kislova.ov@kntud.com.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0223-1860>  
SCOPUS Author ID: 22034723000

<sup>4</sup>аспірант, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [nikul74@gmail.com](mailto:nikul74@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7063-2826>

## РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГРАФІТУ ДЛЯ АНОДІВ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Робота присвячена розробці технології хімічного очищення вітчизняного графіту із застосуванням суміші сульфатної кислоти та амоній фториду. Отримано акумуляторний графіт марки GAK-2 чистотою 99,95 %. Очищений графіт відповідає вимогам до анодних матеріалів для літій-іонних акумуляторів, що підтверджено електрохімічними випробуваннями. Зокрема, він демонструє високу ємність (350 мА·год/г), первинну кулонівську ефективність (близько 90 %) та стабільність під час циклування. Наведені результати свідчать про перспективність розробленого метода хімічного очищення графіту для виробництва анодних матеріалів літій-іонних акумуляторів.

Ключові слова: очищення графіту; обробка мінеральними кислотами; амоній фторид; електрохімічні дослідження; літій-іонні акумулятори (ЛІА); гальваностатичне циклування.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Україна входить до числа провідних європейських країн за обсягами запасів графіту, що відкриває значні перспективи для її виходу на міжнародний ринок стратегічних матеріалів. Графіт є алотропною модифікацією вуглецю, але завдяки особливостям кристалічної гексагональної будови він має такі властивості, як низька твердість, висока електропровідність та вогнетривкість. Графіт є ключовим матеріалом для багатьох високотехнологічних галузей, зокрема для виробництва літій-іонних акумуляторів (ЛІА), які широко застосовуються як джерело енергії для електротранспорту [1].

На території України розташовані одні з найбільших родовищ графіту у Європі, зокрема Заваллівське родовище, яке характеризується значними покладами вуглецевого матеріалу [2]. Водночас вітчизняні підприємства не володіють необхідними технологіями для видобутку графіту з високим рівнем чистоти. Це створює бар'єри для українських компаній у конкурентній боротьбі на світовому ринку, де попит на високоочищений графіт неухильно зростає.

**Постановка проблеми.** Оскільки графіт для виготовлення анодів ЛІА повинен мати високу чистоту (понад 99,95 %), особливо важливим є застосування ефективних методів очищення вуглецевого матеріалу. Крім забезпечення необхідного ступеня чистоти графіту, метод очищення повинен бути економічно вигідним та екологічно безпечним. Розробка такого методу значно підвищить конкурентну спроможність вітчизняної продукції на міжнародному ринку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для очищення графіту від домішок використовуються такі технологічні методи, як механічне, термічне, хімічне та фізико-хімічне очищення [3].

Одним із найпростіших і найдоступніших методів видалення домішок із графітової сировини є механічний метод [4]. Хоча цей метод відзначається низькими витратами та простотою реалізації, він не забезпечує рівня чистоти матеріалу понад 98 %.

Термічне очищення передбачає нагрівання графіту до температур біля 3000 °С для розкладання та випаровування небажаних домішок [5]. Однак значні енергетичні витрати та необхідність попереднього очищення графіту іншими методами значно збільшують його собівартість [6].

Фізико-хімічне очищення графіту [7] комбінує фізичні та хімічні методи для ефективного видалення домішок. До основних технологій належать флотація та електроліз, які сприяють підвищенню чистоти матеріалу. Хоча ці методи дозволяють досягти достатньо високого рівня очищення, вони все ще не гарантують необхідної чистоти для використання у виробництві ЛПА та потребують застосування спеціалізованого обладнання.

Відносно дешевим методом є хімічне очищення, яке базується на застосуванні лужних і кислотних технологій для отримання високочистого графіту. Іноді ці методи комбінують для досягнення більш глибокого очищення. Лужна обробка ефективно видаляє силікатні домішки, тоді як при взаємодії з мінеральними кислотами або їх сумішшю легко розчиняються оксиди алюмінію, феруму, лужних та лужноземельних металів [8].

Застосування сумішей мінеральних кислот із фторвмісними реагентами є ефективною стратегією для видалення з природного графіту як силікатних включень, так і оксидів металів. Зокрема, використання фтористоводневої кислоти (HF) дозволяє утворювати розчинні фторсилікатні комплекси та розчиняти оксиди металів [9]. Проте через надзвичайно високу токсичність і корозійну активність фтористоводневої кислоти в сучасних дослідженнях її дедалі частіше замінюють на тверді фториди, такі як фторид натрію (NaF) або фторид амонію (NH<sub>4</sub>F), які в присутності кислот генерують HF *in situ* [10].

Обробка сумішшю концентрованої хлоридної кислоти та натрій фториду забезпечує ефективне очищення графіту від домішок і дозволяє досягти вмісту вуглецю до 98,37 %, тоді як комбінація хлоридної кислоти з амоній фторидом забезпечує ще вищу чистоту - до 99,47 %. Перевагою застосування амоній фториду є збільшення розчинності амоній гексафторосилікату ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) порівняно з натрій гексафторосилікатом (Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>), що сприяє глибшому очищенню [11].

Недоліком наведених вище сумішей є висока леткість HCl при тривалому нагріванні, що призводить до зменшення її ефективності. Нітратна кислота (HNO<sub>3</sub>), у свою чергу, є сильною кислотою-окисником. Її застосування призводить до утворення побічних продуктів і часткового окиснення графіту.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх публікацій свідчить, що суміш мінеральних кислот з амоній фторидом дає можливість досягти достатньо високого рівня чистоти графіту. Проте ефективна та конкурентноспроможна технологія очищення вітчизняних графітів різних марок із Заваллівського родовища поки не розроблена.

**Метою статті** є розробка ефективного та екологічно безпечного методу очищення графіту кислотною сумішшю, який може забезпечити ступінь чистоти вуглецевого матеріалу 99,95 %, а також дослідження електрохімічних характеристик одержаного графіту як анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів.

**Виклад основного матеріалу.** У межах міжнародного проєкту 101103752-GR4FITE3 програми "Горизонт Європа" наукова група КНУТД розробляє технологію хімічного очищення графіту з використанням розбавлених розчинів сульфатної кислоти та амоній фториду.

У цьому дослідженні використовували комерційні зразки графіту різних марок із початковою чистотою 92–99 %. Обробку проводили розчинами сульфатної кислоти з концентрацією від 10 до 40 %, до яких додавали амоній фторид у кількості 0,01–1,00 М. Хімічне очищення виконували при температурі 60–80 °С, а тривалість процесу варіювали від 30 до 120 хвилин. Після очищення зразки ретельно промивали дистильованою водою до досягнення нейтрального значення рН, а потім висушували в сушильній шафі при 105 °С.

Ефективність очищення зразків оцінювали за їхньою зольністю, яку визначали шляхом озолоння наважки графіту в муфельній печі до постійної маси при температурі 1050 °С.

Зольність зразку графіту ( $X$ ) у відсотках розраховували за формулою (1) [12]:

$$X = \frac{m}{M} \cdot 100 \quad (1)$$

де  $m$  – маса зольного залишку,

$M$  – маса наважки графіту.

Для оцінки можливості застосування очищеного графіту як анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів були виготовлені електроди. Суспензію, що містила очищений графіт, полівініліденфторид (ПВДФ) як зв'язуючий компонент та ацетиленову сажу у співвідношенні 90:8:2 (ваг. %), наносили на мідну фольгу. Отримані електроди висушували у вакуумі при 120 °С протягом 12 годин.

Електрохімічні характеристики визначали у двохелектродних комірках, де як протиелектрод використовували металевий літій. Як електроліт застосовували 1 М розчин  $\text{LiPF}_6$  у суміші етиленкарбонату (ЕС) та диметилкарбонату (DMC) у співвідношенні 1:1 за об'ємом. Комірки збирали в середовищі аргону, що містив вологу та кисень на рівні  $<1$  ppm. Гальваностатичне циклування проводили в діапазоні потенціалів 0,01–2,0 В, оцінюючи такі параметри, як початкова ємність, ефективність циклування та стабільність ємності з часом.

Результати хімічного очищення графіту сумішшю сульфатної кислоти різної концентрації з амоній фторидом представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати хімічного очищення зразків ТОВ «Заваллівський графіт»

| Марка графіту | Склад розчину хімічного очищення                      | Вміст вуглецю, % |       |
|---------------|-------------------------------------------------------|------------------|-------|
|               |                                                       | До               | Після |
| GUPG-92       | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (40 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 92,67            | 99,56 |
| GUPG-92       | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (20 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 92,67            | 99,41 |
| GEO-94        | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (40 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 94,46            | 99,60 |
| GEO-94        | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (20 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 94,46            | 99,67 |
| GTO-95        | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (40 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 95,37            | 99,80 |
| GTO-95        | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (20 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 95,37            | 99,65 |
| GAK-2         | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (20 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 99,19            | 99,95 |
| GAK-2         | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (10 %), $\text{NH}_4\text{F}$ | 99,19            | 99,94 |

Джерело: розроблено авторами.

З'ясовано, що зменшення концентрації сульфатної кислоти у реакційній суміші не призводить до суттєвого зниження ефективності очищення марок графітів з високою початковою чистотою. Рівень видалення домішок значно залежить від початкового вмісту золи в матеріалі. Для графітів із початковим вмістом вуглецю нижче 95 % (наприклад, GUPG-92, GEO-94), для досягнення високого ступеня чистоти необхідно підвищувати концентрацію сульфатної кислоти (до 40 %) і використовувати більшу кількість амоній фториду.

Натомість при очищенні графіту марки GAK-2, який характеризується низьким рівнем зольності (початковий вміст вуглецю 99,19 %), ефективне видалення залишкових домішок забезпечується вже за використання лише 10–20 % сульфатної кислоти в

поєднанні з мінімальною кількістю  $\text{NH}_4\text{F}$ . Такий підхід дозволяє значно зменшити шкідливий вплив на довкілля, оскільки знижується використання агресивних реагентів (зокрема, пов'язаних з утворенням  $\text{HF}$ ) і кількість утворених відходів. Таким чином, графіт марки GAK-2 є оптимальним об'єктом для реалізації екологічно доцільного методу очищення, що особливо важливо для масштабного промислового застосування. Зменшення концентрації кислоти й фториду амонію знижує ризики для навколишнього середовища, витрати на реагенти та утилізацію відходів.

На мікрофотографіях (рис. 1) видно, що після обробки 10%-м розчином сульфатної кислоти домішки на поверхні графіту GAK-2 практично відсутні.

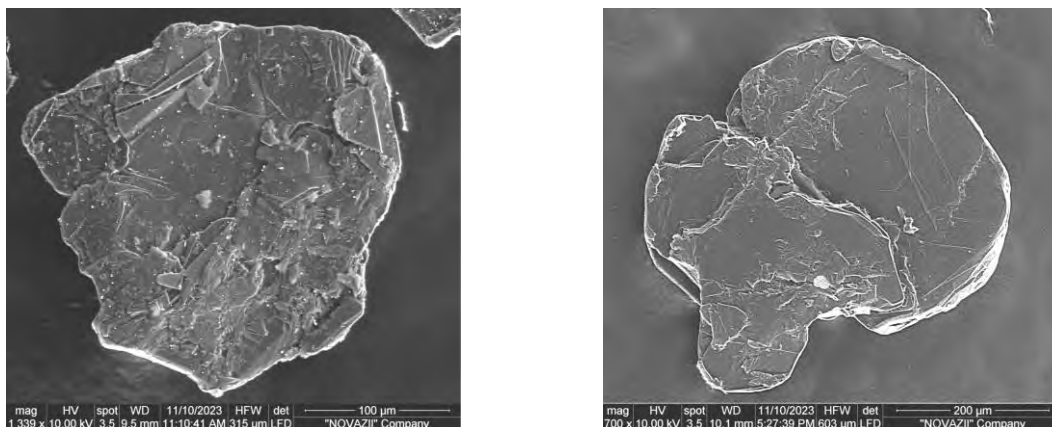


Рис. 1. Розподіл домішок на поверхні частинок графіту GAK-2 до (ліворуч) та після (праворуч) проведення хімічної очистки

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати озолення підтверджують високий рівень очищення графіту марки GAK-2 (табл. 1).

У роботі проведено комплексне оцінювання електрохімічних властивостей хімічно очищеного природного графіту з метою визначення його придатності для застосування в анодах ЛІА. Основну увагу приділено зразкам графіту марки GAK-2, які пройшли обробку в умовах мінімізованого використання реагентів, а саме розбавленої сірчаної кислоти та амоній фториду, що дозволяє знизити екологічне навантаження процесу очищення.

На рис. 2 зображено типові зарядно-розрядні криві електрода, виготовленого на основі очищеного зразка GAK-2. Тестування проводилося в напівелементі  $\text{Li}$ /графіт при густині струму  $\text{C}/10$ . Криві демонструють добре виражені плато, характерні для стадій інтеркаляції та деінтеркаляції іонів літію в графітову матрицю, що свідчить про високу кристалічність і структурну впорядкованість матеріалу.

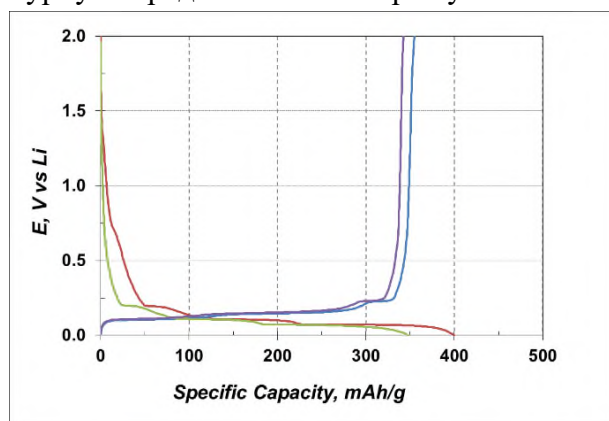


Рис. 2. Заряд-розрядні криві електрода на основі очищеного GAK-2

Джерело: розроблено авторами.

Питомі значення ємності після першого розряду для зразків GAK-2 та GUPG-92 становили відповідно 356,4 та 354,7 мА·год/г (табл. 2). Варто зазначити, що зразок GAK-2 має значно вищу початкову чистоту (вміст вуглецю >99 %), що дозволило досягти цільових характеристик без необхідності використання концентрованих реагентів.

Таблиця 2 – Електричні характеристики зразків графіту після хімічного очищення

| Марка графіту | Q заряду, мА·год/г | Q розряду, мА·год/г | Кулонівська ефективність, % |
|---------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|
| GUPG-92       | 399,4              | 354,7               | 88,8                        |
| GAK-2         | 391,1              | 356,4               | 91,1                        |

Джерело: розроблено авторами.

Початкова кулонівська ефективність для зразка GAK-2 склала 91,1 %, що свідчить про обмежене споживання літію під час формування пасивного міжфазного шару (SEI). Порівняно зі зразком GUPG-92, який продемонстрував нижчий показник (88,8 %), можна припустити, що залишкові домішки в графіті GUPG-92 каталізують побічні реакції з електролітом. Отже, підвищена чистота графіту прямо корелює з ефективністю початкових циклів.

На рис. 3 представлено динаміку зміни питомої ємності графіту GAK-2 протягом 100 циклів. Електроди демонструють високу стабільність: після початкового формування SEI-плівки ємність стабілізується і зберігається майже незмінною упродовж тривалого періоду.

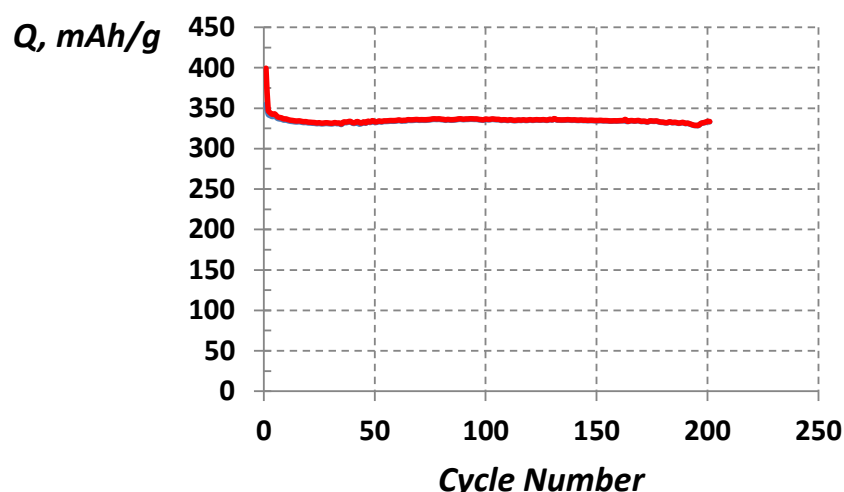


Рис. 3. Циклування електроду на основі очищеного графіту GAK-2

Джерело: розроблено авторами.

Отже, отримані результати демонструють високу стабільність анодного матеріалу протягом тривалого циклування.

Електричні характеристики графіту можуть бути суттєво покращені після проведення сферитизації частинок графіту та покриття їх вуглецевим матеріалом для зменшення питомої поверхні графіту.

**Висновки.** Розроблено метод хімічного очищення вітчизняного графіту марки GAK-2 з застосуванням розбавленого розчину сульфатної кислоти та амоній фториду, який дозволяє підвищити вміст вуглецевого матеріалу до 99,95 %.

Електрохімічні випробування очищеного графіту марки GAK-2 підтвердили його відповідність вимогам до анодних матеріалів для літій-іонних акумуляторів, зокрема щодо ємності (350 мА·год/г), кулонівської ефективності (нарівні 90 %) та стабільності під час циклування. Очищений графіт марки GAK-2 може бути успішно використаний для створення анодів ЛІА.

Розроблений метод з точки зору екологічних стандартів є одним із найбільш перспективних для промислового виробництва високочистого графіту, придатного для виготовлення анодів літій-іонних акумуляторів.

### Подяка

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

### Список використаних джерел

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, 5363–5870. <https://doi.org/10.1039/D0SE00175A>.
2. Rudko, G. (2021) Geology of graphite deposits of Ukraine and prospects of extraction in modern conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology* 3, 67-74. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.94.08>.
3. Jara, A., Betemariam, A., Woldetinsae, G., Kim, J. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology* 29, 671–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.
4. Peng, Z., Li, D., Fang, W., Zhang, J., Zhang, R., Qiu, Y., Sun, K. (2023). Improved Flotation of Fine Flake Graphite Using a Modified Thickening Process. *Separations*. 10(5), 275. <https://doi.org/10.3390/separations10050275>.
5. Bao, C., Shi, K., Xu, P., Yang, L., Chen H., Dai, Y., Liu, H. (2021). Purification effect of the methods used for the preparation of the ultra-high purity graphite. *Diamond and Related Materials*. 120. 108704. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108704>.
6. Chelgani, C., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., & Gutzmer, J. (2016). A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 37:1. 58-68. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115992>.
7. Kang, W., Ding, S., Li, H., Zhao, H. (2023). Experimental study on flotation of graphite with inorganic electrolytes solution. *Carbon Lett.* 33, 1709–1722. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00531-1>.
8. Zhao, G., Chao, B., Zhao, Z., Nan, D. (2021). Research on Purification Technology of Ultra-Large Flake Graphite Based on Alkali-Acid Method. *MSF*. 1036:104–113. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1036.104>.
9. Al-Sairafi, F.A., Jiang, C., Zhong, Z., & Saleh, B. (2022). Study on purification of flake graphite by heat activation and hydrofluoric acid. *Advances in materials and processing technologies* <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2079172>.
10. Xie W., Wang Z., Kuang J.C., Xu H., Yi S., Deng Y., & et al. (2016). Fixed carbon content and reaction mechanism of natural microcrystalline graphite purified by hydrochloric acid and sodium fluoride. *International Journal of Mineral Processing* 155, 45–54 <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.08.002>.
11. Jara, A., Kim, J. (2020). Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion Battery anodes. *Materials Today Communications*. 25.101437, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.
12. Макєєва, І.С., Кислова, О.В., Патлун, Д.В., Хоменко, В.Г., Нікулін, Д.О. (2024). Розробка методів підвищення ефективності хімічного очищення природного графіту. *Технології та інжиніринг*. 2 (19), 117-124. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2>

### 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, 5363–5870. <https://doi.org/10.1039/D0SE00175A>.
2. Rudko, G. (2021) Geology of graphite deposits of Ukraine and prospects of extraction in modern conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology* 3, 67-74. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.94.08>.

3. Jara, A., Betemariam, A., Woldetinsae, G., Kim, J. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology* 29, 671–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.
4. Peng, Z., Li, D., Fang, W., Zhang, J., Zhang, R., Qiu, Y., Sun, K. (2023). Improved Flotation of Fine Flake Graphite Using a Modified Thickening Process. *Separations*. 10(5), 275. <https://doi.org/10.3390/separations10050275>.
5. Bao, C., Shi, K., Xu, P., Yang, L., Chen H., Dai, Y., Liu, H. (2021). Purification effect of the methods used for the preparation of the ultra-high purity graphite. *Diamond and Related Materials*. 120. 108704. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108704>.
6. Chelgani, C., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., & Gutzmer, J. (2016). A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 37:1. 58-68. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115992>.
7. Kang, W., Ding, S., Li, H., Zhao, H. (2023). Experimental study on flotation of graphite with inorganic electrolytes solution. *Carbon Lett.* 33, 1709–1722. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00531-1>.
8. Zhao, G., Chao, B., Zhao, Z., Nan, D. (2021). Research on Purification Technology of Ultra-Large Flake Graphite Based on Alkali-Acid Method. *MSF*. 1036:104–113. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1036.104>.
9. Al-Sairafi, F.A., Jiang, C., Zhong, Z., & Saleh, B. (2022). Study on purification of flake graphite by heat activation and hydrofluoric acid. *Advances in materials and processing technologies* <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2079172>.
10. Xie W., Wang Z., Kuang J.C., Xu H., Yi S., Deng Y., & et al. (2016). Fixed carbon content and reaction mechanism of natural microcrystalline graphite purified by hydrochloric acid and sodium fluoride. *International Journal of Mineral Processing* 155, 45–54 <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.08.002>.
11. Jara, A., Kim, J. (2020). Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion Battery anodes. *Materials Today Communications*. 25.101437, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.
12. Makheyeva, 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 improving efficiency of natural graphite chemical purification]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technologies and Engineering*, (2(19)), 117-124. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2>.

Отримано 21.05.2025

UDC 678.669

**Volodymyr Khomenko<sup>1</sup>, Iryna Makheyeva<sup>2</sup>, Olha Kyslova<sup>3</sup>, Dmytro Niculin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [v.khomenko@i.ua](mailto:v.khomenko@i.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>

Researcher ID: X-2214-2018. SCOPUS Author ID: 7004402598

<sup>2</sup>PhD, Associate professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [makheyeva.is@knuutd.com.ua](mailto:makheyeva.is@knuutd.com.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>

Researcher ID: X-2580-2018. SCOPUS Author ID: 7003994762

<sup>3</sup>PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving,  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [kislova.ov@knuutd.com.ua](mailto:kislova.ov@knuutd.com.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0223-1860>

SCOPUS Author ID: 22034723000

<sup>4</sup>PhD Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving

Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [nikulin74@gmail.com](mailto:nikulin74@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7063-2826>

**DEVELOPMENT OF GRAPHITE PURIFICATION EFFICIENT CHEMICAL TECHNOLOGY FOR LITHIUM-ION BATTERY ANODES**

Graphite is a key material for many high-tech industries, in particular for production of lithium-ion batteries. Ukraine has significant reserves of natural graphite, but domestic enterprises don't have necessary technologies for its extraction in a highly purified state. Since graphite for the manufacture of lithium-ion batteries anode masses must contain more than 99.95%

carbon material, the use of effective methods for its purification is especially important. In addition to ensuring the required degree of graphite cleanliness, the purification method must be economically viable and environmentally safe. Development of this method will significantly increase competitiveness of domestic products in the international market.

The promising method for purifying graphite is treatment with a mixture of sulfuric acid and ammonium fluoride. Because of acid treatment, the degree of purification of graphite grades GUPG-92, GEO-94, GTO-95 ranged from 99.4% to 99.8%, which is insufficient for use in lithium-ion batteries, while the purity of battery graphite GAK-2 was increased to the required level of 99.95 %.

Electrochemical investigations of purified graphite grade GAK-2 confirmed its compliance with requirements for lithium-ion batteries anode materials. Its capacity was approximately 350 mAh/g, which is a competitive value among modern graphite-based anode materials. The initial coulombic efficiency of the anodes (89–91%) approaches characteristics of commercial graphite materials. Studies of the cyclic stability of chemically purified graphite by analyzing the dependence of the specific capacity on the number of cycles demonstrate high stability of the material during long-term cycling. Electrochemical investigations confirm suitability of purified GAK-2 graphite for use in lithium-ion batteries. Electrical characteristics of graphite can be significantly improved after graphite particles spheroidization and coating them with carbon material to reduce the specific surface area.

**Keywords:** graphite purification; mineral acids treatment; ammonium fluoride; electrochemical investigations; lithium-ion batteries (LIB); galvanostatic cycling.

Fig.: 3. Table: 2. References: 12.