

С. С. Федоров /к. т. н./, М. В. Губинський /д. т. н./, Національна металургійна Академія України,  
А. В. Сибір /к. т. н./, С. М. Форись /к. т. н./, м. Дніпро, Україна  
О. Г. Гогоці, А. Ю. Усенко /к. т. н./

## Дослідження сучасних технології рафінування графітової сировини для виробництва анодів літій-іонних акумуляторів

S. S. Fedorov /Cand. Sci. (Tech.),  
M. V. Gubynskyi /Dr. Sci. (Tech.),  
A. V. Sybir /Cand. Sci. (Tech.),  
S. M. Foris /Cand. Sci. (Tech.), O. G. Gogotsi,  
A. Yu. Usenko /Cand. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine,  
Dnipro, Ukraine

### Review of modern technologies of graphite purification for production of lithium-ion batteries' anodes

**Мета.** Вивчення сучасних методів отримання батарейних марок графіту та визначення на їх основі раціональної технології в умовах України.

**Методика.** Аналіз та критичне зіставлення наявних у відкритому друку технологій та способів рафінування графіту з урахуванням технологічних особливостей кожного з процесів.

**Результати.** Проаналізовано методи хімічного, хлорно-термічного та термічного очищення у щільному та киплячому шарі. Показано, що технологія високотемпературного електротермічного киплячого шару найбільшою мірою відповідає критеріям екологічної безпеки та енергетичної ефективності.

**Наукова новизна.** Встановлено, що для сировинної бази природного графіту України з урахуванням хімічного та гранулометричного складу матеріалу перспективою для подальшого розвитку є технологія рафінування графіту на основі високотемпературних електротермічних печей киплячого шару.

**Практична значущість.** Визначено енергетичні показники технологій виробництва батарейних марок графіту. (Іл. 5. Табл. 1. Бібліогр.: 55 назв.)

**Ключові слова:** літій-іонні акумулятори, графіт, технології рафінування, високотемпературний електротермічний киплячий шар.

**Актуальність проблеми.** Світовий попит на хімічні джерела живлення для автономних приладів обумовлює значну потребу у високоякісному графіті як основній складовій речовині анодних матеріалів. З урахуванням динаміки виробництва електроніки та електромобілів сучасний ринок вуглецевих матеріалів переживає, без перебільшення, революційні зміни, що, у свою чергу, викликає занепокоєння з боку експертів та ключових гравців ринку стосовно ймовірного утворення у найближчій перспективі дефіциту. Тому вже зараз питання ефективного видобутку, переробки та подальшого застосування графіту значною мірою формують стратегічну політику багатьох розвинених країн на державному рівні.

Зольність значною мірою визначає корисні властивості і вартість графіту, у зв'язку з чим цьому показнику приділяється особлива увага. Залежно від сфери застосування допускається вміст хімічних домішок від 13–25 % для деяких ли-

варних марок – ГЛ, аж до значень менше 0,005 % для спектрального та ядерного графіту, а також при отриманні двоокису германію, алмазів і виготовленні напівпровідникових приладів.

Традиційно для рафінування графіту використовують два принципово різних технологічних підходи: термічний і хімічний. На практиці ці методи можуть комбінуватися.

**Мета та завдання досліджень.** У цьому зв'язку, метою пропонованої роботи є детальне вивчення наявних технологій очищення графіту, їх порівняльний критичний аналіз та визначення найбільш обґрунтованої технології для промислового застосування в умовах України.

**Аналіз хімічних методів очищення графіту.** Хімічне видалення домішок з природного і вторинного графіту шляхом кислотного вилугування застосовується практично у всьому світі і набуло найбільшого поширення в Китаї, Бразилії, Австралії та Росії [1, 2–14]. Переважна більшість

компаній здійснюють таку очистку на завершальному етапі обробки графітового концентрату. Як реагенти зазвичай використовують розчини  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$  і  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Причому фторид водню є однією з найбільш популярних і в той же час найбільш небезпечних кислот. Показники очищення графіту хімічним шляхом перевищують 98 %, включаючи можливість отримання батарейних марок з вмістом вуглецю  $\text{Cg} > 99,95$  %.

У випадку природного графіту хімічному очищенню передують збагачення графітових руд. Процес базується на гідрофобних властивостях дисперсного графіту і складається з багатоступеневої флотації за участю збираючих та спінюючих агентів [11–13]. Найбільший ступінь вилучення вуглецю характерний для дрібних фракцій до 100 мкм, а існуючий рівень технології дозволяє досягти вмісту вуглецю в концентраті до 89–94 %. При цьому має місце зворотню пропорційний зв'язок між масовою часткою вуглецю в кінцевому продукті і ступенем його вилучення. Тому видобувні компанії змушені знаходити для себе оптимальний з точки зору виходу кінцевого продукту і прибутку баланс за глибиною збагачення графіту в двох послідовних стадіях: флотації і хімічної обробки.

У [3] наведено результати дослідження очистки мікрокристалічного ПГ, видобутого в провінції Ченжоу (Китай). Матеріал з початковим вмістом вуглецю  $\text{Cg} = 83,08$  % оброблявся в лабораторних умовах розчинами хлорної кислоти  $\text{HCl}$  і фториду натрію  $\text{NaF}$ . Метод показав високу ефективність при видаленні кальцитів  $\text{CaCO}_3$ , галузиту  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  та інших мінеральних домішок при співвідношенні рідкої і твердої фаз 3:1. Оптимальний режим отриманий при температурі 70 °C і часі 2,5 години. Вміст вуглецю збільшено до 98,03 % без видимих змін його кристалічної структури.

У праці В. І. Брагіної і І. І. Бакшеевої (Сибірський федеральний університет) проводилися дослідження комплексної технології збагачення, яка включає стадію флотації вихідного концентрату  $\text{Cg} = 80$  % з подальшою обробкою сірчаною та фосфорною кислотами [4]. Найбільша ефективність методу досягнута при співвідношенні рідкої та твердої фаз 1:2. Тривалість і температура процесу склали відповідно 2 години і 150 °C, а досягнутий рівень очищення – 91 % при ступені вилучення 97,2 %.

Авторами [6] наводяться результати обробки фторидом водню  $\text{HF}$  (48 %) графітового концентрату  $\text{Cg} = 69,74$  % з розміром фракцій 149–841 мкм (Західний Калімантан, Індонезія). Оптимальний режим отриманий при співвідношенні твердої і рідкої фаз 1:5, температурі 180 °C і тривалості процесу 1,5–2 годин. Вміст вуглецю в кінцевому продукті зріс до 98 %.

У дослідженнях [7] для обробки прожареного ПГ  $\text{Cg} = 92,6$  % (Бао Ха, В'єтнам) використовувалася сірчана кислота (10 %) при співвідношенні твердої і рідкої фаз 1:5. Ефективний режим відзначений при кімнатній температурі протягом 2 годин. Масова частка вуглецю збільшена до 98 %. Також відзначається значно менша вартість сірчаної кислоти порівняно із соляною при однакових показниках ефективності.

Схожі результати отримані також в [9] співробітниками Криворізького технічного університету. Дослідження включали термохімічний метод, на першій стадії якого для зниження вмісту кремнію здійснювалося випалення концентрату при температурі 900–950 °C у присутності  $\text{NaCO}_3$ . Друга стадія передбачала вилуговування в умовах оптимальних з точки зору видалення сполук заліза розчином сірчаної кислоти 15 % при співвідношенні твердої і рідкої фаз 1:7. Відмінність рекомендованих режимів [7; 9], вочевидь, пов'язана з різним хімічним складом мінеральних частин.

Співробітниками Київського національного університету технологій та дизайну [8; 10] порівняно недавно розроблена технологія обробки графітових концентратів сумішшю кислот  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HF}$  або  $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}$ . Процеси передбачають одну і тристадійну обробку з підігрівом графіту до 300–400 °C на кожному етапі.

Проведені дослідження для акумуляторного графіту ГАК-1 (ТОВ «Заваллівський графіт») дозволили знизити зольність до 0,01–0,02 % за початкового показника 0,8 % [8]. Ефективність розробленого методу також підтверджена в [10] для графіту марки ГЛ-1. При цьому контрольні випробування шляхом обробки матеріалу окремими розчинами кислот  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$  і  $\text{HF}$  продемонстрували значно меншу ефективність останніх. Зольність продукту на виході складала відповідно 0,35 %, 0,15 і 0,07 %, що не дозволяє рекомендувати монокислоти для отримання батарейного марок графіту з вітчизняних руд.

Істотним недоліком хімічних методів є використання небезпечних агресивних кислот і пов'язаний негативний екологічний аспект цих технологій. У [15] наводиться, як видно, одна з найбільш раціональних схем виробництва графіту для літій-іонних акумуляторів. Процес включає послідовні стадії видобутку, механічної сепарації, флотації, сферидизації і тільки на останньому етапі – обробку реагентами. Беручи до уваги втрати до 70 % матеріалу при формуванні частинок, такий підхід характеризується найменшим навантаженням на навколишнє середовище.

Слід зазначити, що хімічні методи на основі кислот не використовуються в США, Канаді та країнах ЄС [14]. За даними окремих компаній, що спеціалізуються у сфері виробництва, продажу і

застосування графіту [16–17], в цих країнах використовуються певні торгові обмеження на імпорту матеріалу відповідного походження.

**Аналіз термічних методів очищення графіту в щільному шарі.** Термічна очистка графіту з точки зору енергоємності є більш дорогою альтернативою хімічним методам і використовується, головним чином, у виробництві синтетичного графіту. Це дозволяє одночасно вирішувати два технічні завдання: видалення домішок і графітації продукту.

При нагріванні вуглецевої сировини відновлення нелетких оксидів, присутніх у мінеральній частині, спостерігається вже при температурах понад 1000°C [20]. Продукти відновлення переходять безпосередньо в газову фазу або ж утворюють більш тугоплавкі сполуки з вуглецем (карбіди), випаровування яких настає при значно більших температурах. При 2200–2400 °C зольність вуглецевих матеріалів може бути знижена до значень <0,2 % [2, 18]. На практиці ступінь очищення визначається безліччю факторів: видом сировини, фракційним складом, конструкцією печі, хімічним складом футерування, тривалістю і режимом обробки.

Одна з перших праць із системного дослідження впливу термічного рафінування на зольність вуглецевих матеріалів була опублікована в 1934 р. В. С. Веселовським [19]. Автор наводить результати обробки при температурах до 2700 °C смоляного, нафтового і вугільного коксу, а також деревного вугілля й антрациту (рис. 1). Наважка випробуваного зразка оброблялася в нерухомому щільному шарі в горизонтальному графітовому тиглі. Нагрівання останнього здійснювалося резистивним шляхом. Як ізоляція використовувалося подрібнене деревне вугілля, а контроль температури тигля проводився за допомогою оптичного пірометра.

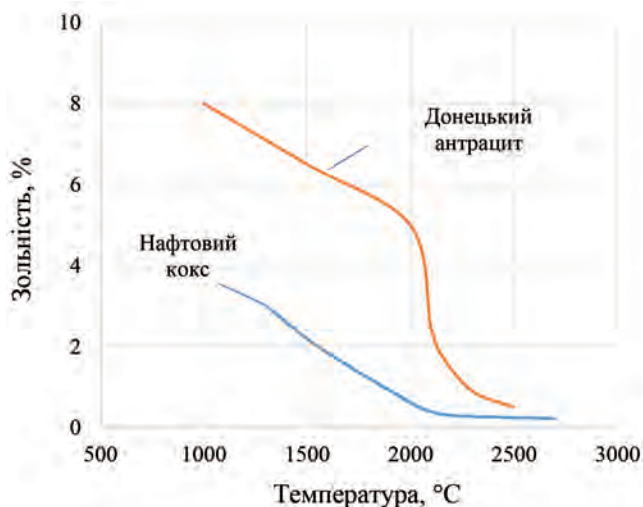


Рис. 1. Залежність вмісту золи окремих матеріалів від температури обробки [19]

В експериментах вихід на задані температури понад 2000 °C здійснювався протягом 60–90 хвилин з подальшою витримкою матеріалу до 30 хвилин. Згідно з отриманими кінетичним кривим складу вуглецевих матеріалів від температури, вміст мінеральних домішок різко знижується в інтервалі температур 1800–2200 °C. В першу чергу, відзначається видалення кальцію при 1200–2000 °C, а потім алюмінію – 1500–2250 °C. Найбільш стійкими були сполуки заліза і кремнію, що вимагало режиму 1800–2700 °C. При температурі ~2700 °C залежно від виду матеріалу частка золи знижувалася до 0,1–0,28 %.

У промисловості термічна очистка та графітація вуглецевих матеріалів синтетичного походження реалізована у високотемпературних агрегатах зі щільним шаром: електрокальцинаторах [20] і печах Ачесона.

Електрокальцинатори (рис. 2) використовуються переважно для прожарювання антрациту як первинної стадії отримання штучного графіту. Конструктивно печі являють собою вертикальну шахту з верхнім і нижнім розташуванням двох електродів. Кусковий матеріал розміром 6–25 мм рухається вниз під дією сили тяжіння і нагрівається прямим пропусканням електричного струму через шар. Продуктивність подібних печей зазвичай варіюється від 0,5 до 1 т/год. Після обробки антрацитів вміст шкідливих домішок по сірці і загальній зольності становить відповідно 0,65–1,32 і <2,5 %.

Згідно з даними промислової експлуатації робочі температури досягають 2300–2500 °C уздовж

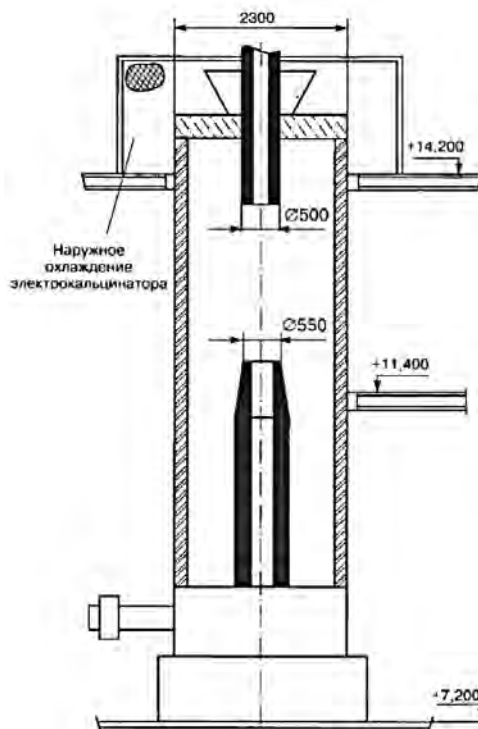


Рис. 2. Схема електрокальцинатора



вертикальної осі печі, де щільність струму найбільша. При цьому мають місце «холодні» зони на периферії з температурами 700–1200 °С, де зосереджена значна частина матеріалу. Зворотна температурна залежність питомого електричного опору для вихідної вуглецевої сировини робить практично неможливим рівномірний хід печі. З метою підвищення якості матеріал часто обробляється по декілька разів, що істотно збільшує енергетичні витрати від 500–700 до 1500–2000 кВт·год/т.

Одним із способів підвищення енергетичної ефективності електрокальцинаторів щільного шару, а також вирівнювання температурного поля за перерізом є застосування висхідного інертного газового потоку. Холодний газ надходить до нижньої зони печі, де відбирає тепло від вже опрацьованого матеріалу, і потім у верхній частині передає енергію матеріалу, що завантажуються.

Комплексний аналіз тепломасообмінних процесів, виконаний в працях на основі математичного моделювання [31–33], показав, що провідну роль у роботі високотемпературного випалювального агрегату зі щільним шаром відіграє так звана турбулентна дифузія газу. Цей механізм обумовлений обтіканням газовим потоком частинок у шарі, у зв'язку з чим масштаб поперечного переносу маси газу і відповідно його теплового потенціалу в напрямі, перпендикулярному руху потоку, визначається фракційним складом матеріалу і поздовжньою швидкістю потоку. Згідно з експертною оцінкою з урахуванням зазначених в [31–33] особливостей, використання інертного середовища може в кілька разів знизити питомі витрати енергії в електрокальцинаторах.

У той же час перспектива застосування електрокальцинаторів для природного графіту і нафтових коксів має розглядатися в контексті фракційного складу сировини і з урахуванням конструктивних особливостей цих печей. Такий аналіз показує, що з огляду на обмежену газопроникність дрібнодисперсних матеріалів, а також низьку термічну стійкість футеровки, електрокальцинатори не можуть розглядатися як агрегати для цілей графітації і рафінування батарейних марок графіту.

У 1895 р. Е. Ачесоном вперше було запропоновано процес виробництва графіту в нерухомому шарі при температурах 3000 °С [27], який з незначними змінами продовжує використовуватися і в наші дні (рис. 3). Розміри сучасних печей ємністю 35–55 т зазвичай складають 12–15 × 3–3,5 м при торцевому розташуванні електродів.

Формовані вуглецеві вироби завантажуються в піч і пересипаються коксом [2, 29], який виконує роль резистивного нагрівального елемента. Це

дозволяє вести обробку виробів будь-яких форм, включаючи дисперсні матеріали у спеціальних графітових контейнерах. Величина робочого струму досягає 60 кА. Повний операційний цикл триває до 2 тижнів і складається з чотирьох етапів: 1) завантаження печі – до 24 годин; 2) підйом температури садки до 2800–3000 °С зі швидкістю близько 40–60 °С/год – ~72 години; 3) поступове охолодження – 190–240 годин; 4) розвантаження.

У сучасних печах Ачесона при температурах 2400–2500 °С зольність графіту знижується до 0,09–0,11 %, однак при цьому дуже важливе застосування «чистих» пересипних матеріалів, таких як пековий кокс і нафтовий кокс, що зменшує ймовірність вторинного забруднення графіту. При більш високих температурах процес дозволяє знизити вміст мінеральних домішок до значень <0,03 %. У той же час режимні особливості роблять процес Ачесона однією з найбільш енергоємних технологій, оскільки використання теплових вторинних енергоресурсів практично неможливе. За потужності 3,0–6,0 МВт, питомі витрати електроенергії сягають 4,5–9 кВт/кг, де верхні значення діапазону відповідають енерговитратам при отриманні ядерного графіту.

**Аналіз термохімічних методів очищення графіту з використанням галогенів.** Одним з різновидів термічного очищення вуглецевих матеріалів є використання в технологічному процесі хлору і його сполук, що дозволяє знизити температуру печі [2, 34–37]. Оксиди металів у присутності вуглецю при високих температурах зв'язуються з хлором, формуючи більш леткі речовини. Наприклад,  $TiO_2$  має температуру плавлення +1843 °С, при реакції з хлором утворює хлорид титану  $TiCl_3$  з температурою конденсації 960 °С. Другою особливістю хлору є його здатність дифундувати через кристалічну решітку графіту, що дозволяє ефективно застосовувати хлор для великих гра-

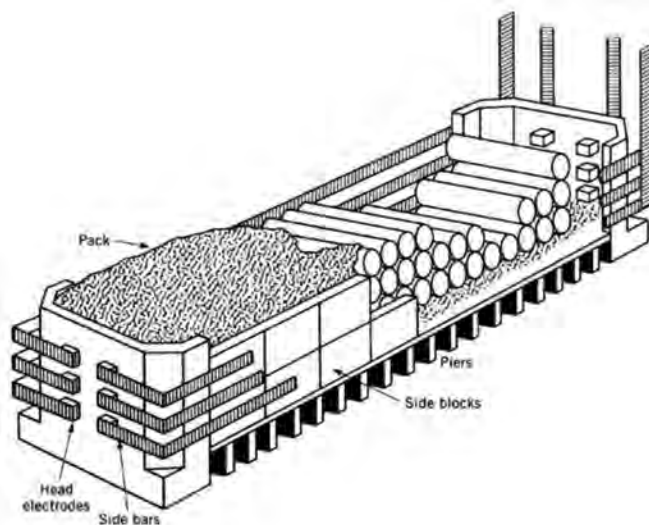


Рис. 3. Схема печі Ачесона

фітових виробів та отримувати чистий продукт навіть при температурах 1700–1800 °С.

Перші праці з розвитку хлорно-термічних методів належать до середини 40-х рр. минулого століття. Слід відзначити внесок Г. К. Баннікова, М. А. Авдєєнко (СРСР), Росса і Макферсона (США), під керівництвом яких було вивчено поведінку хімічних домішок в атмосфері хлору і розроблено технологію очищення до  $A = 0,001\text{--}0,007\%$  за температур 1900–2250 °С [2].

У праці [34] очищення графіту проводили в атмосфері хлору при тиску 6–50 кПа і 1900–2300 °С в лабораторних печах Таммана. Вихідний матеріал оброблявся в нерухомому стані протягом 6–7 годин. Зольність у кінці процесу складала близько 3–5 ppm при початковому значенні 1 %.

Лабораторна піч для очищення графіту (Stratmin Inc., Канада [35]) також мала внутрішню камеру непрямого нагріву  $\varnothing 7,62 \times 25$  см, де здійснювався прямий контакт хлору з матеріалом у щільному шарі при розрідженні 0,1–1,0 кПа. Автори відзначають проникаючу здатність хлору через графіт, що обумовило створення додаткової зовнішньої оболонки, заповненої азотом під тиском +4,2 кПа. Результати обробки природного графіту 150–177 мкм з початковою зольністю 6 % протягом 30 хвилин, підтвердили високу ефективність методу зі ступенем очищення  $C_g = 99,99 \pm 0,01\%$ . За даними [17, 36] технологія з використанням хлору для ПГ набула промислового застосування в компанії Northern Graphite (Канада).

Схожі результати ефективності хлору в лабораторних умовах були отримані для вуглецевих нанотрубок [37]. Температура процесу становить 1000 °С при тривалості до 10 хвилин. Кількість домішок при цьому зменшилася на кілька порядків. Однак автори в той же час відзначають приріст загальної маси матеріалу на 3 %, що обумовлено насиченням вуглецевих структур хлором.

У [38] запатентована піч очищення графіту, в якій нагрів здійснювався комбінованим шляхом: індукційним і непрямим. Герметичне виконання печі дозволяло проводити обробку в контрольованій атмосфері, включаючи вакуум. Як активний реагент використовувалися гази:  $Cl_2$ ,  $H_2$  і  $CCl_2F_2$ . Матеріал нерухомо розміщується на розподільній решітці для проходу газу. Термообробка проводилася при температурі 2450–2500 °С протягом 5–24 годин. Однак даних про отримані практичні результати у роботі не наведено.

У наші дні ряд промислових підприємств пропонують невеликі високотехнологічні печі періодичної дії ємністю до 15 кг зі ступенем очищення <5 ppm в атмосфері галогенів і температурою до 2300 °С [39]. З урахуванням експлуатаційних характеристик таких агрегатів питомі витрати енергії складають 3,5–7,0 кВт·год/кг. Що стосується

промислового застосування хлорно-термічних методів для очистки графіту в апаратах киплячого шару, то в технічній літературі інформація про подібний досвід відсутня.

**Аналіз термічних методів очищення графіту в електротермічному киплячому шарі.** Розвиток технології електротермічного киплячого шару (ЕТКШ) отримав свій поштовх у період 60–70-х рр. ХХ ст., що було пов'язано з необхідністю виробництва синильної кислоти, карбідів, хлориду цирконію, ядерного графіту, а також термічної переробки вуглеводнів [40–48]. Особливий інтерес з теми становлять публікації з докладним описом конструкцій і результатів випробувань.

Авторами [49] для виробництва  $ZrCl_4$  шляхом хлорування оксиду цирконію в присутності графіту запропонована конструкція електротермічної печі у вигляді вертикальної шахти псевдозрідження. Електроди розташовувалися по периферії у вигляді 4 вертикальних сегментів, утворюючи пари. Подібне розділення передбачало, з одного боку, збільшення терміну їх служби, а з іншого – симетричну роботу установки. Як ізолятор використовувався подрібнений кварцовий пісок. Експериментальний зразок мав внутрішню висоту і діаметр відповідно 90 і 32 см. Електричний струм 1000–700 А при напрузі 5–7 В проходив крізь киплячий шар. Процес ЕТКШ був реалізований при температурі 800–1000 °С. Істотним недоліком конструкції, з точки зору обробки вуглецевих матеріалів, є обмеження за температурою, обумовлене стійкістю електроізоляційних матеріалів при надвисоких температурах.

Найбільш виправданою для високотемпературної обробки матеріалів у ЕТКШ є конструкція печі, в якій один або кілька графітових електродів, занурені у шар [40–43, 48], а сам робочий простір також футерований графітом і виконує роль іншого електрода. Так, у 1978 р компанією Graphite Synthesis (Чикаго, США) [50] вперше запропоновано промислово піч ЕТКШ з концентричним розташуванням електродів для десульфурзації вугілля, нафтового і металургійного коксу (рис. 4а).

Робоча камера печі (рис. 4а) має розширення і таким чином розділена на дві циліндричні частини: нижню – зону киплячого шару; і верхню – надшарову (сепараційну) зону більшого діаметру. Діаметри цих зон забезпечують співвідношення швидкостей газу в нижній і верхній частинах 2:3. Для запобігання утворенню шлакових депозитів у вихідному патрубку газового тракту встановлено додатковий нагрівач, що підтримує температуру вузла вище точки конденсації металевих домішок. Перевагою технології порівняно з аналогами [40–43, 48] є безперервний режим роботи: матеріал завантажується і вивантажується за допомогою шнекових живильників.



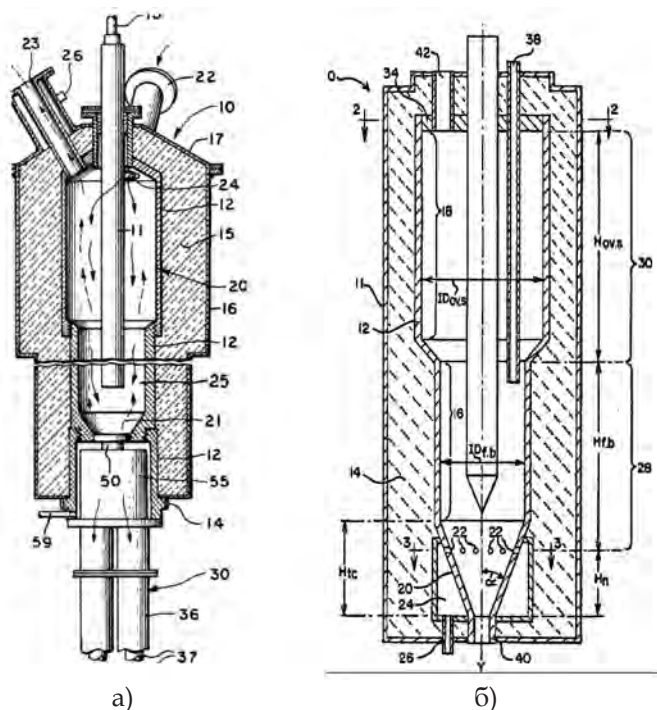


Рис. 4. Печі ЕТКШ конструкції Superior Graphite

Нагрівання в печі здійснюється прямим пропусканням електричного струму через киплячий шар вуглецевого матеріалу до температур 1700–2400 °С при робочому режимі джерела живлення 80–120 В. Псевдозріджуючим агентом є азот, проте можливе використання газу на основі хлору і водню для зниження температури процесу.

Випуск готового продукту передбачений з нижньої частини печі в холодильник. Останній являє собою теплообмінник у вигляді чотирьох вертикальних труб з нержавіючої сталі, футерованих зсередини графітом, і дозволяє знизити температуру матеріалу з 2500 до 1100 °С. Подальше охолодження до 200 °С виконується у водоохолоджуваному шнековому живильнику.

Особливий інтерес становлять результати промислових випробувань печі (рис. 4а). У ході обробки нафтового коксу діаметром 6,3 мм при температурах до 2300 °С середній час перебування матеріалу склав 25 хвилин, а швидкість підйому температури – 80 °С/с. Вміст сірки зменшився з 1,49 до 0,045 %, при цьому спостерігається часткова трансформація аморфної структури матеріалу в кристалічну. Питомі витрати енергії склали 2,13 кВт·год/кг. Таким чином, отримані результати перевищують аналогічні показники альтернативної технології десульфурації в обертових печах, в яких швидкість нагріву становить порядку 0,3 °С/с при витратах енергії 4,4 кВт·год/кг.

Вже у 1988 р. компанія Superior Graphite, як правонаступник Graphite Synthesis, захистила патентом аналогічну конструкцію печі в Європі [51]. Рівень заявлених робочих температур склав 2500–2772 °С. Піч мала внутрішній діаметр 350 мм

при ємності активної зони кипіння 38,6 кг. Нейтралізація горючих компонентів газів, що відходять, здійснювалася в допалювачі. Як пусковий матеріал для виведення печі на задану температуру використовувався нафтовий кокс розміром 211–853 мкм з подальшим переведенням печі на необхідний вид сировини.

Автори [51] наводять результати трьох промислових випробувань при безперервній роботі установки: для норвезького ПГ (до 76 мкм – 70 %, А = 11,8 %), мексиканського ПГ (211–853 мкм, А = 27 %) і антрациту (до 853 мкм, А = 10–11 %). Продуктивність установки склала 11,3–20 кг/год при потужності 100 кВт. Зольність матеріалів після термообробки знизилася до 0,1 %, 0,3–0,4 і 0,4–0,6 % відповідно. Відзначається зменшення густини природних графітів на 4–10 % і збільшення цього показника для антрациту на 5 %. Слід звернути увагу на істотний «угар» ПГ, 53–62 %, що обумовлено винесенням дрібних фракцій і хімічною взаємодією вуглецю з іншими елементами.

У новій конструкції печі від 2005 р. (рис. 4б) Superior Graphite внесла ряд змін: нижня частина ділянки під електродом має виражену конічну форму з периферійним тангенціальним підведенням псевдозріджуючого агента [52]. Це дало можливість ефективно обробляти матеріал до 106 мкм у фонтануючому шарі з відповідним зменшенням швидкості газу на 10–15 %. Кут нижнього конуса склав 40–60°; висота активної зони киплячого шару < 2 діаметрів; висота сепарації простору – 1–1,5 висоти киплячого шару. Цікавою особливістю є конічна форма нижнього торця електрода, що дозволяє поліпшити його контакт із шаром.

Піч (рис. 4б) представлена як агрегат для обробки будь-яких видів коксу і ПГ при температурах 2200–2400 °С. Завантаження матеріалу здійснюється безпосередньо в нижню циліндричну зону (активну зону термообробки) через спеціальний патрубок. Циркуляція матеріалу в робочому просторі в результаті прийнятої схеми газорозподільного вузла характеризується вираженим центральним висхідним потоком і низхідним по периферії.

Відповідно до заявлених результатів випробувань при зольності сировини 0,6–1,65 % технологія дозволяє повністю очистити матеріал від домішок. Вміст сірки знижується від 0,48 до 0,0012 % залежно від виду матеріалу. У той же час питання енергетичних показників конструкції авторами не обговорювалося. Можна припустити менші втрати з газами, що порівнянні зі схемою на рис. 4а, оскільки для обробки використовується дрібні фракції у фонтануючому шарі.

Слід зазначити, що сьогодні Superior Graphite позиціонує себе як єдина у світі компанія, здатна

на основі технології ЕТКШ виробляти в промислових обсягах батарейні марки графіту викопного і синтетичного походження з вмістом вуглецю  $C_g > 99,95\%$  [53]. При цьому температура обробки сировини досягає  $3000\text{ }^\circ\text{C}$ . Аналіз режимних параметрів технології ЕТКШ дозволяє оцінити величину питомих витрат електроенергії при очищенні графіту на рівні  $2\text{--}3\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$  без урахування можливого використання ВЕР.

У 2013 р. з метою підвищення енергетичної ефективності технологічних комплексів Superior Graphite, які працюють на базі печей ЕТКС, Інститутом технології газу (Чикаго, США) була розроблена когенераційна система утилізації теплоти [54, 55]. Димові гази печей згорають у допалювачі, що виконує також функцію котла-утилізатора (рис. 5). Пара використовується для вироблення електроенергії в турбіні протитиску. Теплота готового продукту утилізується для нагріву живильної води котла-утилізатора за допомогою проміжного теплоносія. Ефективність запропонованої схеми залежно від завантаження всього комплексу виражена в зниженні енергоспоживання на  $35\text{--}50\%$  з пропорційним зниженням викидів шкідливих речовин і парникових газів.

**Підсумки.** Зведені дані аналізу відомих технологій графітації і рафінування графіту наведені

в табл. 1. З урахуванням характеристик сировинних матеріалів, а також вимог до вмісту золи в батарейному графіті основним конкурентоспроможним методом обробки вуглецевих матеріалів у відношенні до хімічного очищення є саме печі ЕТКШ. У результаті реалізації поточного процесу ці агрегати мають на  $40\text{--}60\%$  кращі енергетичні показники, ніж печі Ачесона, додатково дозволяючи при цьому утилізувати теплові ВЕР. Разом з тим необхідно відзначити, що у зв'язку з обмеженим результатом практичної реалізації технологічно рішення залишаються до кінця не вивченими, що ускладнює використання цього методу в промисловості.

**Висновки.** Аналіз сучасного рівня науки і техніки показав, що серед відомих технологій фінішної стадії отримання батарейних марок графіту найбільш привабливим є спосіб обробки вуглецевої сировини у високотемпературних ЕТКШ, який дозволяє у комплексі вирішувати технічні завдання термічного очищення матеріалу від сторонніх хімічних домішок та його графітації.

Порівняно з відомими поширеними альтернативними процесами (в електротермічних печах щільного шару, методах хлорно-термічної обробки та кислотного вилугування) зазначений спосіб відрізняється високим ступенем техноло-

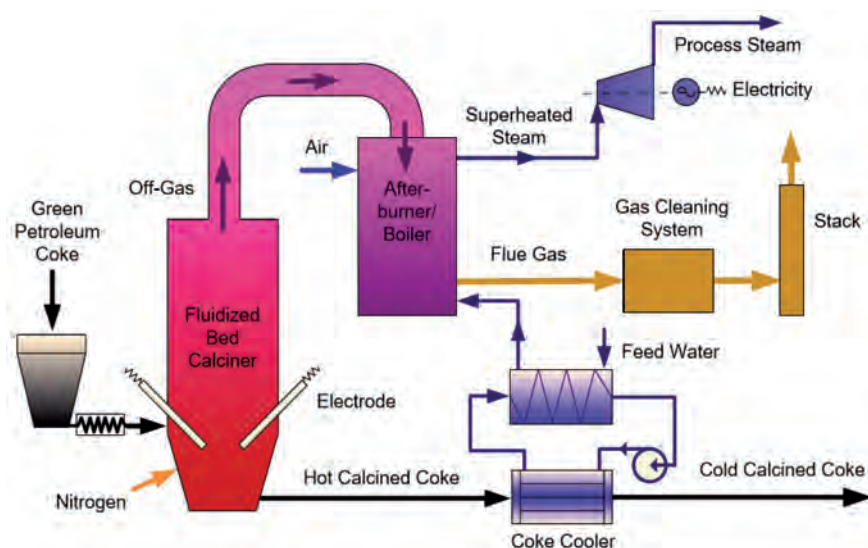


Рис. 5. Принципова схема системи утилізації теплоти печі ЕТКШ Superior Graphite

Таблиця 1

Технологічні показники основних методів рафінування графіту

Технологія	Вміст $C_g, \%$	Фракційний склад сировини, мкм	Температура процесу, $^\circ\text{C}$	Енергоємність, $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$
Хімічне очищення	$>99,98$	$<1000$	До $900$	$0,2\text{--}0,6$
Електрокальцинатори	До $97,5$	$6000\text{--}25000$	До $2500$	$1,5\text{--}2,0$
Печі Ачесона	$>99,97$	Без обмежень	До $3000$	$4,5\text{--}9,0$
Хлорно-термічні методи	$>99,9995$	Без обмежень	До $2300$	$3,5\text{--}7,0$
Печі ЕТКШ	$>99,95$	$150\text{--}1250$	До $3000$	$2,0\text{--}3,0$



гічності завдяки реалізації поточного руху матеріалу, а також конкурентоспроможними показниками енергоспоживання на рівні 2,0–3,0 кВт·год/кг, собівартості та відповідно низького рівня негативного впливу на навколишнє середовище.

### Бібліографічний список / References

1. Li, J., Henry, F., Feng, Y. (2017, June). *How to develop best carbon/graphite products for lead-carbon battery applications (Superior Graphite)*. Poster session presented at the 10th International conference on lead-acid batteries LABAT'2017, Golden Sands, Bulgaria.

2. Соседов В. П. Графитация углеродистых материалов / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. – Москва: Металлургия, 1987.

Sosedov, V. P. Chalyh, E. F. (1987). *Grafitacija uglerodistykh materialov*. Moscow, Metallurgija.

3. Xie, W., Wang, Z., Kuang, J., Xu, H., Yi, S., Deng, Y., Cao, T., Guo, Z. (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. doi 10.1016/j.minpro.2016.08.002.

4. Брагина В. И. Разработка технологии обогащения графитовых руд / В. И. Брагина, И. И. Бакшеева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 9. – С. 133–137.

Bragina, V. I., Baksheeva, I. I. (2012). *Razrabotka tekhnologii obo-gashcheniya grafitovykh rud*. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten, no. 9, pp. 133-137.

5. Беляев С. В. Перспективные способы подготовки литейных графитов / С. В. Беляев, Г. А. Королева, С. И. Лыткина, Л. И. Мамина, Т. Р. Гильманшина // Журнал Сибирского федерального университета. Инженерия и Технологии. – 2014. – № 4 (7). – С. 462–466.

Belyaev, S. V., Koroleva, G. A., Lytkina, S. I., Mamina, L. I., Gilmanshina, T. R. (2014). *Perspektivnye sposoby podgotovki liteynykh grafitov*. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Inzheneriya i Tekhnologii, no. 4 (7), pp. 462-466.

6. Syarifuddin, F., Florena, F. F., Hanam, E. S., Trisko, N., Kustiyanto, E., Arinton, G. (2016). Effect of acid leaching on upgrading the graphite concentrate from West Kalimantan (Indonesia). *AIP Conference Proceedings: 2nd Padjadjaran International Physics Symposium 2015*, 1712(1). doi:10.1063/1.4941905.

7. Thi, H. T., Hong, N. D. (2017). Sulfuric Acid Leaching Process for Producing High Purity Graphite from 92.6% C to 98% C. *World Journal of Research and Review*, 5 (1), 23-26.

8. Коробко Д. І. Вплив домішок та методологія їх визначення в графіті як в активному матеріалі літій-іонних джерел струму / Д. І. Коробко, В. Г. Хо-

менко, В. З. Барсуков, І. С. Макеева // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 220–226.

Korobko, D. I., Khomenko, V. G., Barsukov, V. Z. Makeeva, I. S. (2015). *Vpliv domishok ta metodologiya ikh viznachennya v grafiti yak v aktivnomu materiali litiy-ionnikh dzherel strumu*. Visnik Kiivs'kogo natsional'nogo universitetu tekhnologiy ta dizaynu. Seriya: Tekhnichni nauki, no. 3, pp. 220-226.

9. Олейник Т. А. Химическое обогащение графит содержащих продуктов / Т. А. Олейник, О. И. Дзюба, В. Н. Харитонов, Е. В. Кулаков // Наукові праці Доецького національного університету. – 2008. – № 15 (131)ю – С. 139–151.

Oleynik, T. A., Dzyuba, O. I., Kharitonov, V. N., Kulakov, E. V. (2008). *Khimicheskoe obogashchenie grafit soderzhashchikh produktov*. Naukovi pratsi Doets'kogo natsional'nogo universitetu, no. 15 (131), pp. 139-151.

10. Лихницький К. В. Розробка технології виробництва активних графіт-полімерних композицій для хімічних джерел струму: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. В. Лихницький, КНУТД. – Київ, 2011.

Likhmits'kiy, K. V. (2011). *Rozrobka tekhnologii virobnitstva aktiv-nikh grafit-polimernikh kompozitsiy dlya khimichnikh dzherel strumu (avtoreferat kandidatskoy dissertatsii)*. KNUTD, Kiev.

11. Peng, W., Qiu, Y., Zhang, L., Guan, J., & Song, S. (2017). Increasing the Fine Flaky Graphite Recovery in Flotation via a Combined Multiple Treatments Technique of Middlings. *Minerals*, 7 (11), 208. doi:10.3390/min7110208.

12. Ding, S. F., & Niu, Y. P. (2013). Research on Purification Technics of some Flake Graphite. *Advanced Materials Research*, 753-755, 119-123. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.753-755.119.

13. Олійник М. О. Удосконалення технології збагачення графітової сировини Заваллівського родовища / М. О. Олійник, А. І. Макачова // Гірничий вісник. – 2014. – № 97. – С. 210–215.

Oliynik, M. O., Makachova, A. I. (2014). *Udoskonalennya tekhnologii zbagachennya grafitovoi sirovini Zavallivs'kogo rodovishcha*. Girnichiy visnik, no. 97, pp. 210-215.

14. Coosa Graphite Project. (n.d.). Retrieved February 20, 2018, from <http://alabamagraphite.com/coosa-graphite-project>.

15. Inagaki, M., Kang, F., Toyoda, M., Konno, H. (2014). *Advanced materials science and engineering of carbon*. Amsterdam: Elsevier.

16. Barsukov, I. V., Johnson, C. S., Doninger, J. E., Barsukov, V. Z. (2003). *New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.

17. Gubinskiy, M. V., Fedorov, S. S., Livitan, N. V., Gogotsi, A. G., Barsukov, I. V., Rohathi, U. (2013).



Analysis of Energy Efficiency of Furnaces for High Temperature Treatment of Carbon Materials. *Metallurgical and Mining Industry*, 5 (2), 71-76.

18. Zaghba, K., Songb, X., Gueria, A., Rioux, R., Kinoshita, K. (2003). Purification process of natural graphite as anode for Li-ion batteries: chemical versus thermal. *Journal of Power Sources*, 119-121, 8-15. doi: 10.1016/S0378-7753(03)00116-2.

19. Веселовский В. С. Исследование свойств искусственного графита / В. С. Веселовский, В. И. Перце // Журнал физической химии. – 1934. – № 5 (5). – С. 557-573.

Veselovskiy, V. S., Pertse, V. I. (1934). *Issledovanie svoystv iskusstvennogo grafita*. Zhurnal fizicheskoy khimii, no. 5 (5), pp. 557-573.

20. Лакомский В. И. Электрические и электроконтактные свойства электродного термоантрацита / В. И. Лакомский. – Киев: Академперіодика, 2006.

Lakomskiy, V. I. (2006). *Elektricheskie i elektrokontaktnye svoystva elektrodnoho termoantratsita*. Kiev, Akademperiodika.

21. Петров Б. Ф. Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита / Б. Ф. Петров. – Киев: Экотехнология, 2006.

Petrov, B. F. (2006). *Energoberezhnenie pri proizvodstve elek-trodnoho termoantratsita*. Kiev: Ekotekhnolgiya.

22. Gasik, M. M., Gasik, M. I., Urazlina, O. Yu., Kutuzov, S. V. (2010). Modelling and optimisation of anthracite treatment in an electrocalcinorator. *Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future*, Helsinki, June 6-9, 339-348.

23. Perron, J., Bouvette, J.-F., Dupuis, M. (1996). Optimization of Anthracite Calcination Process in A Vertical Electric Arc Furnace. *The Proceedings of the conference: Annual meeting and exhibition of the Minerals, Metals and Materials Society (TMS)*, Anaheim, CA (United States), Feb 4-8, 597-602.

24. Yang, K., Sun, Y. (2010). *US Patent No. US7792177B2*. U.S. Patent Office.

25. Фролов Ю. Ф. Патент РФ № 2396498 / Фролов Ю. Ф., Лебедев В. А. – Москва: Роспатент ФИПС, 2010.

Frolov, Yu. F., Lebedev, V. A. (2010). *Patent RF No. 2396498*. Moscow: Rospatent FIPS.

26. Johansen, J., Vatland, A. (1998). *US Patent No. US6157667A*. U.S. Patent Office.

27. Acheson, E. G. (1896). *US Patent No. US568323A*. U.S. Patent Office.

28. Педченко А. Ю. Теплоэлектричний стан печей графітування Кастнера: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Ю Педченко; Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського». – Київ, 2017.

Pedchenko, A. Yu. (2017). *Teploelektrichniy stan pechey grafituvan-nya Kastnera* (avtoreferat

kandidats'koi disertatsii, Natsional'niy tekhnichniy universitet "Kyiv'skiy politekhnichniy institut im. I. Sikors'kogo"), Kyiv.

29. Ragan, S., & Marsh, H. (1983). Science and technology of graphite manufacture. *Journal of Materials Science*, 18 (11), 3161-3176. doi:10.1007/bf00544139.

30. Jean, A. G., Cordier, J. A. G., Dussart, B. E. A., Rollot, P. H. (1989). *US Patent No. US4867848A*. U.S. Patent Office.

31. Форись С. Н. Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей / С. Н. Форись, С. С. Федоров, М. В. Губинский // Системні технології: регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – 2008. – № 2. – С. 98-104.

Foris', S. N., Fedorov, S. S., Gubinskiy, M. V. (2008). *Matema-ticheskoe modelirovanie shakhtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechey*. Sistemni tekhnologii, no. 2, pp. 98-104.

32. Форись С. Н. Исследование влияния турбулентной диффузии газа на работу шахтных известково-обжиговых печей / С. Н. Форись, С. С. Федоров, О. Г. Федоров // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2008. – № 2. – С. 146-150.

Foris', S. N., Fedorov, S. S., Fedorov, O. G. (2008). *Issledovanie vliyaniya turbulentnoy diffuzii gaza na rabotu shakhtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechey*. Integrovani tekhnologii ta energoberezhennya, no. 2, pp. 146-150.

33. Федоров, С. С. Исследование процессов сме-сеобразования в шахтных известково-обжиговых печах / С. С. Федоров, С. Н. Форись, Р. Г. Хейфец, М. В. Губинский, А. Ю. Усенко, А. Г. Ковпак, А. В. Агаджанян // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: Збірник наукових праць. – 2010. – № 2. – С. 184-197.

Fedorov, S. S., Foris', S. N., Kheyfets, R. G., Gubinskiy, M. V., Usenko, A. Yu., Kovpak, A. G., Agadzanyan, A. V. (2010). *Issledovanie protsessov smeseobrazovaniya v shakhtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechakh*. Tekhnichna teplofi-zika ta promislova teploenergetika, no. 2, pp. 184-197.

34. Kotlensky, W. V., Danadio, R. N. (1969). Low pressure halogen purification of graphite of graphite. *Abstract Papers presented at the Ninth Conference on Carbon, Boston College, Boston, Massachusetts*, 16-20 June 1969, 710. doi: 10.1016/0008-6223(69)90538-7.

35. Lalancette, J.-M. (2001). *Canadian Patent No., CA2163221C*. Canadian Intellectual Property Office.

36. The Future of North American Graphite Production. (n.d.). Retrieved February 20, 2018, from <http://northerngraphite.com>

37. Chng, E. L., Poh, H. L., Sofer, Z., & Pumera, M. (2013). Purification of carbon nanotubes by high temperature chlorine gas treatment. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15 (15), 5615. doi:10.1039/c3cp50348h

38. Matsumoto, T., Hoshikawa, T. (1995). *US Patent No., US5419889A*. U.S. Patent Office.
39. Purification Furnaces. Retrieved February 20, 2018, from <http://www.tevtechllc.com/graphite-purification.jsp>
40. Gupta, C. K., & Sathiyamoorthy, D. (1999). *Fluid bed technology in materials processing*. Boca Raton: CRC Press.
41. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое / В. А. Бородуля. – Минск: Наука и техника, 1973.
- Borodulya, V. A. (1973). *Vysokotemperaturnye protsessy v elek-trotermicheskom kipyashchem sloe*. Minsk: Nauka i tekhnika.
42. Забродский С. С. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем / С. С. Забродский. – Москва: Энергия, 1971.
- Zabrodskiy, S. S. (1971). *Vysokotemperaturnye ustanovki s psev-doozhizhennym sloem*. Moscow: Energiya.
43. Кожан, А. П. Электросопротивление кипящего слоя графитовых частиц / А. П. Кожан, К. Е. Махорин, С. П. Гориславец // Инженерно-физический журнал. – 1968. – № 15 (4). – С. 648–652.
44. Закожурников С. С. Совершенствование процесса производства карбида кремния путем изменения организации подвода теплоты [Электронный ресурс]: дис. ... канд. техн. наук / С. С. Закожурников; Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва, 2016. – Режим доступа: <https://mpei.ru/diss/SitePages/DisCouncils.aspx>
- Zakozhurnikov, S. S. (2016). *Sovershenstvovanie protsessy proiz-vodstva karbida kremniya putem izmeneniya organizatsii podvoda teploty* (kandidatskaya dissertatsiya, Natsional'nyy issledovatel'skiy universitet "MEI"), Moscow. Available at: <https://mpei.ru/diss/SitePages/DisCouncils.aspx>
45. Алексеева Т. И. Технологические решения в производстве карбида циркония: анализ, оценка состояния и перспектив / Т. И. Алексеева, Г. В. Галевский, В. В. Руднева, С. Г. Галевский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2017. – № 23 (1). – С. 256–270. doi: 10.18721/JEST.230126.
- Alekseeva, T. I., Galevskiy, G. V., Rudneva, V. V., Galevskiy S. G. (2017). *Tekhnologicheskie resheniya v proizvodstve karbida tsirkoniya: analiz, otsenka sostoyaniya i perspektiv*. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta, 23(1), 256-270. doi: 10.18721/JEST.230126.
46. Johnson, H. S. (1961). Reactions in a fluidized coke bed with self-resistive heating. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 39 (3), 145-147. doi:10.1002/cjce.5450390309.
47. Малиновский А. И. Локальная проводимость кипящего слоя, состоящего из электропроводных частиц / А. И. Малиновский, О. С. Рабинович, В. А. Бородуля, А. Ж. Гребеньков, А. М. Сидорович // Инженерно-физический журнал. – 2012. – № 85 (2). С. 239–245.
- Malinovskiy, A. I., Rabinovich, O. S., Borodulya, V. A., Greben'kov, A. Zh., Sidorovich, A. M. (2012). *Lokal'naya provodimost' kipyashchego sloya, sostoyashchego iz elektroprovodnykh chastits*. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal, no. 85 (2), pp. 239-245.
48. Jones, A. L. (1966). *Electrical resistivity of carbon granules in a fluidized bed* (Ph.D. thesis, Iowa State University, Ames, US). Retrieved from <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/3106>.
49. Ishizuka, H. (1979). *US Patent No. US4158695A*. U.S. Patent Office.
50. Markel, R. F., Goldberger, W. M. (1979). *US Patent No. US4160813A*. U.S. Patent Office.
51. Goldberger, W. M., Carney, P. R., Reed, A. K. (1988). *European Patent No. EP 0274165B1*. Munich, Germany: European Patent Office.
52. Zak, M., Harrison, W., Doninger, J. (2005). *US Patent No. US20050062205A1*. U.S. Patent Office.
53. Li, J., Henry, F., Feng, Y. (2017, June). *How to develop best carbon/graphite products for lead-carbon battery applications (Superior Graphite)*. Poster session presented at the 10th International conference on lead-acid batteries LABAT'2017, Golden Sands, Bulgaria.
54. Kozlov, A., Chudnovsky, Y., Khinkis, M., Yuan, H., & Zak, M. (2014). Advanced Green Petroleum Coke Calcination in an Electrothermal Fluidized Bed Reactor. *EPD Congress, 2014*, 45-53. doi: 10.1002/9781118889664.ch6.
55. Гордеев, А. Н., Залогин, Г. Н., Колесников, А. Ф. Экспериментальное исследование уноса массы углеродных материалов в потоке чистого диссоциированного азота [Электронный ресурс] / А. Н. Гордеев, Г. Н. Залогин, А. Ф. Колесников // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2010. – № 9. – Режим доступа: <http://www.chemphys.edu.ru>
- Gordeev, A. N., Zalogin, G. N., Kolesnikov, A. F. (2010). *Eksperimental'noe issledovanie unosa massy uglerodnykh materialov v potoke chistogo dissotsirovannogo azota*. Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike, no. 9. Available at: <http://www.chemphys.edu.ru>

**Цель.** Изучение современных методов получения батарейных марок графита и определение на их основе рациональной технологии в условиях Украины.

**Методика.** Анализ и критическое сопоставление имеющихся в открытой печати технологий и способов рафинирования графита с учетом технологических особенностей каждого из процессов.



**Результаты.** Проанализированы методы химической, хлорнотермической и термической очистки в плотном и кипящем слое. Показано, что технология высокотемпературного электротермического кипящего слоя в наибольшей степени соответствует критериям экологической безопасности и энергетической эффективности.

**Научная новизна.** Установлено, что для сырьевой базы природного графита Украины с учетом химического и гранулометрического состава материала перспективой для дальнейшего развития является технология рафинирования графита на основе высокотемпературных электротермических печей кипящего слоя.

**Практическая значимость.** Определены энергетические показатели технологий производства батарейных марок графита.

**Ключевые слова:** литий-ионные аккумуляторы, графит, технологии рафинирования, высокотемпературный электротермический кипящий слой.

**Purpose.** The study of modern methods of obtaining battery graphite graphs and the definition of their basis of rational technology in Ukraine.

**Methodology.** Analysis and critical comparison of open-label technologies and graphite refining techniques,

taking into account the technological features of each process.

**Findings.** The methods of chemical, chlorothermic and thermal purification in a dense and boiling layer are analyzed. It is shown that the technology is a high-temperature electrothermal fluidized bed most meets the criteria of environmental safety and energy efficiency.

**Originality.** It is established that for the raw material base of natural graphite of Ukraine, taking into account the chemical and granulometric composition of the material, a prospect for further development is the technology of refining of graphite on the basis of high-temperature electrothermal furnaces of the boiling layer.

**Practical value.** The energy indicators of technologies of development of battery graphite brands are determined.

**Key words:** lithium-ionic accumulators, graphite, refining technologies, high-temperature electrothermic boiling layer.

**Рекомендована к публикации**  
д. т. н. М. В. Губинским

**Поступила 20.06.2018**

