

# Енергосберегаючі технології

УДК 621.365.32:004.942(048.83)

DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2019.02>

**Панов Є.М.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Лазарєв Т.В.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Карвацький А.Я.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Лелека С.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
**Мікульонюк І.О.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Деркач В.В.<sup>3</sup>**, **Тютюнник П.О.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ**

просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: anton@rst.kpi.ua

<sup>2</sup> **ДП «Конструкторське Бюро “Південне” ім. М.К. Янгеля», Дніпро**

вул. Криворізька, 3, 49008 Дніпро, Україна, e-mail: lazarev.t.v@gmail.com

<sup>3</sup> **Приватне Акціонерне Товариство «Український графіт», Запоріжжя**

Північне шосе, 20, 69600 Запоріжжя, Україна, e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua

<sup>4</sup> **Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя**

вул. Жуковського, 64, 69063 Запоріжжя, Україна, e-mail: Altyu10@bigmir.net

## Сучасний стан ресурсоенергозбереження у технології виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів (Огляд)

Розглянуто переваги застосування електрокальцинаторів для виробництва вуглецевмісних наповнювачів електродної промисловості. Виконано аналіз конструкцій електрокальцинаторів, наведено їх переваги та недоліки, описано фізичні процеси, що відбуваються у них. Проведено критичний аналіз теоретично-експериментальних методів дослідження фізичних процесів під час термооброблення вуглецевмісних матеріалів у електричних печах. На його підставі зроблено висновок про те, що для розробки ресурсоенергоєфективних технічних рішень з модернізації технології виробництва наповнювачів в електрокальцинаторах потрібне розумне поєднання методів математичного моделювання з окремими експериментальними дослідженнями на промисловому обладнанні. Показано, що промислове впровадження ресурсоенергоєфективних технічних рішень з модернізації технології виробництва наповнювачів у електрокальцинаторах дало можливість отримати такі показники ефективності: для електрокальцинаторів з прожарювання антрацити ресурс роботи збільшився з 1 до 6 міс, питомі витрати електроенергії зменшилися на (50–100) кВт·год/т; для електрокальцинаторів з графітування нафтового коксу ресурс роботи збільшився з 2 діб до 1 року, питомі витрати електроенергії зменшилися більше ніж на 1600 кВт·год/т у порівнянні з класичною технологією. *Бібл. 37, рис. 7, табл. 1.*

**Ключові слова:** електрокальцинатор, вуглецевмісний наповнювач, антрацит, нафтовий кокс, числове моделювання.

Напівфабрикатом для виробництва електродних виробів є вуглецевмісні композиції, з яких формують заготовки та потім піддають їх високотемпературній обробці [1–3]. Вуглецевмісні композиції отримують у процесі змішування твердого наповнювача з рідким зв'язуючим (сполучним). Сировиною для виробництва вуглецевого наповнювача є різні види коксу (нафтовий, пековий, кам'яновугільний тощо), антрацит, термоантрацит [4–6]. Основними вимогами, що ставляться до наповнювачів, є змочуваність їх зв'язуючим, висока електропровідність, механічна міцність та термічна стійкість [1, 7]. Фізичні властивості наповнювачів суттєво впливають на експлуатаційну стійкість одержуваних вуглеграфітових електродів [4, 8]. Головною функцією зв'язуючого є забезпечення суцільності та пластичності електродної маси під час її формування у виробі. Як зв'язуюче зазвичай використовують кам'яновугільні або нафтові пеки (м'який, середньо- та високотемпературний), що відрізняються температурами розм'якшення [9].

Основною метою процесу термообробки під час виготовлення вуглецевого наповнювача з антрациту або сирого коксу різного походження є створення умов для структурної перебудови матеріалу, що прожарюється. Це забезпечує максимальне ущільнення вихідної сировини, збільшення її механічної міцності, електро- й теплопровідності та термостійкості [10–12]. У процесі прожарювання відбувається стабілізація усадки матеріалу наповнювача, що дає можливість контролювати й керувати об'ємними змінами електродних виробів під час їх подальшої термічної обробки.

Мета роботи полягає в огляді сучасного стану та тенденцій розвитку теоретичних та експериментальних досліджень такої ресурсоенергоємної технології, як технологія виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів.

### **Пічне обладнання для високотемпературного оброблення вуглецевмісного наповнювача**

Для термооброблення вуглецевмісної сировини за температур (900–1400) °С використовуються обертові барабанні, ретортні та шахтні електричні печі, або електрокальцинатори [6, 13–16].

Основою конструкції обертової барабанної печі є футерований вогнетривими металевий барабан завдовжки (40–60) м, який встановлюється на фундамент під кутом (2,5–5)° [6]. За рахунок обертання барабана печі зі швид-

кістю (1–5) об./хв, згорання природного газу та горючих компонентів легких газів сипкий матеріал нагрівається, перемішується та рухається вздовж внутрішнього робочого простору печі. Суттєвими недоліками цих печей є значний вигар вуглецю сипкого матеріалу (понад 10 %), а також значна неоднорідність фізичних властивостей одержуваного наповнювача.

У ретортних печах сипкий матеріал нагрівається теплотою димових газів, яка передається крізь вогнетривку стінку, що дає можливість отримувати однорідний за фізичними властивостями вуглецевмісний матеріал [1]. Конструкція ретортної печі являє собою розділений на секції металевий футерований короб, кожна секція якого має декілька реторт та канали, по яких проходять димові гази. Леткі гази, що виділяються з оброблюваної сировини, завдяки каналам спеціальної форми змішуються та згорають разом з природним газом. Механізми завантаження та розвантаження працюють синхронно, що забезпечує неперервність процесу термооброблення сипкого матеріалу. Ретортні печі забезпечують термооброблення вуглецевмісних матеріалів до температур (1150–1200) °С.

Технології вуглецевого наповнювача в обертових та ретортних печах за показниками якості готового продукту, енергоефективності та ресурсозбереження значно поступаються технології з електричним нагріванням сировини в електрокальцинаторах.

Термооброблення вуглецевмісного матеріалу в електрокальцинаторах полягає в його нагріванні за рахунок джоулевої теплоти, що виділяється під час проходження електричного струму крізь сипкий електропровідний матеріал, що рухається у робочому просторі електропечі [13–16] (рис.1).

Електрокальцинатор — це шахтна електродна опора постійного або змінного струму, яка складається з металевої циліндричної обичайки, зсередини футерованої вогнетривкими та теплоізоляційними матеріалами, з осьовим розташуванням двох електродів, до яких підводиться електричний струм (рис.1, а). Циліндрична порожнина електропечі, або робочий простір, може бути постійного або змінного по висоті поперечного перерізу (рис.1, б). Зверху робочого простору розташований живильний вузол, призначений для подачі сировини у піч, знизу — розвантажувальний механізм, призначений для вивантаження термообробленого матеріалу. Рівень електричної потужності печі та продуктивність механізму розвантаження однозначно визначають рівень температури та тривалість перебуван-

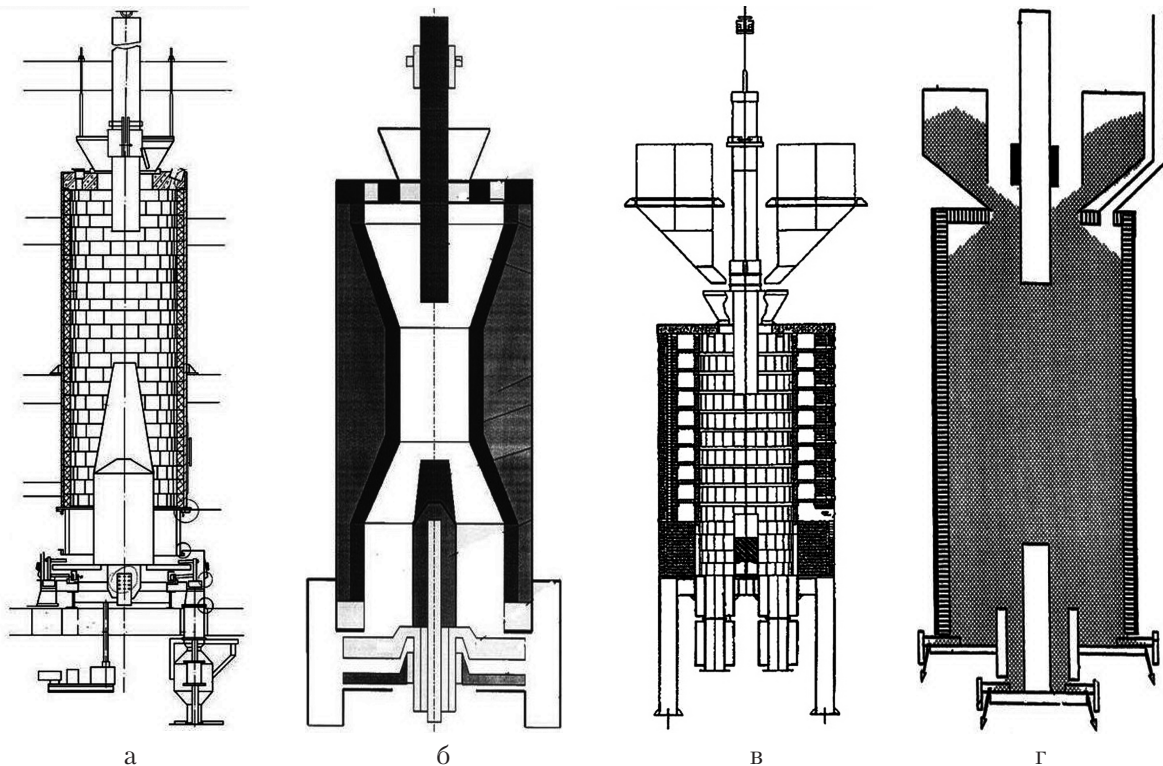


Рис.1. Конструкції електрокальцинових агрегатів [13, 15]: а – рядовий двостадійний; б – з дросельовальним пристроєм; в – з периферійним нагрівом теплою від згоряння легких газів; г – з подвійним вивантаженням матеріалу.

ня оброблюваного матеріалу в зоні прожарювання. Високотемпературне оброблення вуглецевих матеріалів (антрациту) в електрокальцинових агрегатах зазвичай відбувається за температури (1200–1300) °С. Однак існують конструкції електрокальцинових агрегатів для одержання високоякісного графітованого нафтового коксу, у яких рівень термообробки сягає (2600–3000) °С [17].

Прожарювання вуглецевмісного наповнювача в рядовому електрокальциновому агрегаті (рис.1, а) відбувається у дві стадії, що знижує продуктивність та відповідно підвищує питомі витрати електроенергії [15]. Двостадійна робота цих агрегатів пов'язана з тим, що після першої стадії прожарювання, внаслідок значної нерівномірності температурного поля у робочому просторі печі, отримують наповнювач зі значною неоднорідністю його фізичних властивостей. Тому для підвищення однорідності властивостей готового продукту використовують другу стадію термооброблення.

Електрокальциновий агрегат з утилізацією теплоти згоряння легких (рис.1, в), що виділяються з оброблюваного матеріалу, забезпечує більш високу рівномірність температурного поля печі порівняно з рядовим, але потребує додаткового очисного та паливкового обладнання [15].

Конструкція електрокальцинових агрегатів з двома механізмами вивантаження (рис.1, г) надає можливість розділяти термооброблений матеріал на периферійний (з середньою температурою обробки (700–1300) °С) та центральний (з середньою температурою обробки (2300–2600) °С) [15]. При цьому одночасно отримуються два види термообробленого матеріалу: вуглецевий наповнювач звичайної якості та високоякісний графітований кокс, який можна також використовувати як карбюризатор у металургії. У конструкції даного електрокальцинових агрегатів функцію високотемпературної теплоізоляції також виконує низькотемпературний периферійний шар термооброблюваного матеріалу, наявність якого значно зменшує вимоги до вогнетривкої футеровки електропечі та підвищує експлуатаційний ресурс обладнання.

У працях [14, 15] сформульовано основні задачі, які потрібно вирішувати під час проектування нових ресурсоефективних конструкцій електрокальцинових агрегатів:

- зменшення нерівномірності електричного та, як наслідок, температурного поля у горизонтальних перерізах електрокальцинових агрегатів;
- створення надійної системи керування електроживленням електрокальцинових агрегатів, що забезпечує мінімізацію нерівномірності у розпо-

ділі електричного струму в оброблюваному матеріалі;

- організація шляху проходження матеріалу крізь робочий простір електропечі, який забезпечить перебування всієї сировини у зоні прожарювання з максимальним рівнем температури;

- вирішення проблеми вигорання вогнетривкої футеровки у зонах найбільшого термічного навантаження;

- усунення нестабільності електричних характеристик процесу електрокальцинування, що пов'язана з циклічністю роботи механізму завантаження-вивантаження.

### **Уявлення про фізичні процеси, що відбуваються при високотемпературному обробленні наповнювача в електрокальцинаторах**

Фізичну модель процесу високотемпературного оброблення сипких вуглецевмісних матеріалів у шахтній електропечі розглянемо на прикладі електрокальцинатора з дросель-шайбою [18] для виробництва термоантрациту (рис.2) [15, 16]. Робочий простір печі являє собою циліндр, у верхній та нижній торцевих частинах якого розміщені графітові електроди, до яких підводиться однофазний змінний електричний струм. Між електродами розташована дросель-шайба, призначена для підвищення рівня температури оброблення сипкого вуглецевмісного матеріалу. Система водяного охолодження печі призначена для захисту від перегріву найбільш термонапружених частин печі, до яких належать п'єдестал нижнього електрода та розвантажувальний стіл. Також можливе застосування додаткового водяного або примусового повітряного охолодження кожуха електропечі. Леткі, що виділяються під час прожарювання антрациту, виводяться системою газовідведення, розташованою у верхній частині печі. У нижній частині електропечі розміщено розвантажувальний стіл, концентрично до якого рухаються лопатки, які знімають з нього частину термообробленого матеріалу, який потім надходить до вагового дозатора. Розвантажувальна система електропечі може працювати у двох режимах.

Перший — це циклічний режим, за якого встановлюється періодичність вивантаження матеріалу. При цьому лопатки обертаються з максимальною швидкістю доки не буде набрана наперед задана величина дози. Після набору заданої дози вивантаження матеріалу зовсім припиняється.

Другий — це неперервний режим, за якого лопатки розвантажувального столу постійно обертаються з регульованою швидкістю, а дозатор реєструє кількість вивантаженого матеріалу.

Продуктивність електропечі є змінною величиною, визначається дозою та частотою вивантаження термообробленого сипкого матеріалу або швидкістю обертання лопаток. Завдяки системі подачі сировини рівень сипкого матеріалу в електрокальцинаторі завжди підтримується сталим.

Сипкий матеріал в електропечі рухається вниз уздовж вертикальної осі її робочого простору, а газу, що утворюються у процесі виділення залишкових летких та часткового окиснення матеріалу, рухаються вгору та виводяться через систему газовідведення. Нагрівання електропровідного сипкого матеріалу в печі здійснюється за рахунок безпосереднього проходження крізь нього електричного струму, що спричинює виділення у ньому Джоулевої теплоти. Фізичні процеси, що супроводжують термічне оброблення сипкого вуглецевмісного матеріалу, включають таке: складний рух сипкого матеріалу в робочому просторі печі під дією сил гравітації та обертанням лопаток; проткання електричного струму крізь електропровідні еле-

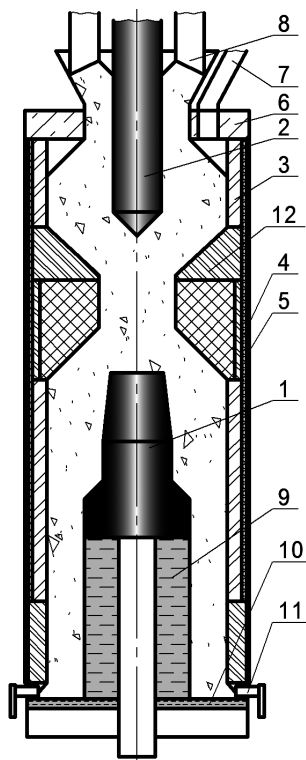


Рис.2. Схема шахтної однофазної електропечі для прожарювання вуглецевмісного наповнювача [18]: 1 — нижній електрод; 2 — верхній електрод; 3 — вогнетривка футеровка; 4 — теплоізоляція; 5 — сталеві обичайки; 6 — бетонна пробка; 7 — газохід; 8 — живильник; 9 — водоохолоджувальний п'єдестал нижнього електрода; 10 — розвантажувальний стіл; 11 — розвантажувальний механізм; 12 — дросель-шайба.

менти конструкції, у тому числі через електропровідний сипкий матеріал; складний теплообмін усередині печі та ззовні з оточуючим середовищем; рух газів у зворотному напрямку крізь шар сипкого матеріалу. Електричне поле у печі вважається безвихровим, термоелектричні ефекти не враховуються.

За температур нижчих за 1000 °С у процесі нагрівання сировини в електропечі відбувається видалення вільної вологи та сорбованих речовин, коксування різних органічних сполук та розкладання нетривких неорганічних речовин (гідратів й карбонатів), тобто видалення летких домішок. До хімічного складу летких передусім входять  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ , а також вуглеводні та невелика кількість сполук сульфуру.

При прожарюванні антрациту на 40–50 год після пуску електрокальцинатора застосовується підпалювання летких газів. Завдяки розрідженню, що створюється димососом системи газовідведення електропечі, продукти горіння видаляються крізь газохід та димову трубу в навколишнє середовище. У робочому просторі електрокальцинатора внаслідок наявності розрідження відбувається підсмоктування повітря, що забезпечує процес окиснення летких газів та деякої частини сировини на поверхні сипкого матеріалу.

Теплота, що виділяється під час горіння летких газів у верхній зоні електропечі, відіграє важливу роль у процесі термічного оброблення антрациту, підвищуючи температуру матеріалу, що надходить у зону прожарювання. Процеси горіння летких газів та часткове окиснення сировини у шахтній електропечі ґрунтуються на відомих хімічних реакціях процесів газифікації частинок твердого палива [19].

Леткі гази, що виділяються під час високотемпературного оброблення антрациту, мають такий склад, %:  $CO_2$  – (2–5);  $CO$  – (5–10);  $H_2$  – (65–70);  $CH_4$  – (1–2);  $N_2$  – (15–20);  $H_2S < 1$  [20, 21]. Сумарний тепловий ефект реакцій окиснення газів складає 9,51 МДж/м<sup>3</sup>.

Згідно з експериментальними даними [19], тепловий ефект від окиснення вуглецевого матеріалу становить 138,0 кДж/(моль·К), що майже втричі менше від теоретичного значення. Це пояснюється тим, що на початковій стадії окиснення вуглецю відбувається за екзотермічною реакцією з утворенням  $CO_2$ , потім – за ендотермічною з утворенням  $CO$ .

За даними лабораторних досліджень та промислової практики прожарювання антрациту в шахтній електропечі [1, 20], сумарний вигар вуглецевого матеріалу складає (1–5) %.

Оскільки термооброблюваний в електропечі матеріал належить до класу сипких матеріалів

[22], то його фізичні властивості беруться ефективними, ізотропними та залежними від температури. Фізичні властивості конструкційних матеріалів електропечі також можна вважати ізотропними та залежними від температури.

Наведена фізична модель роботи електрокальцинатора перш за все є основою для побудови адекватних математичних моделей, з використанням яких виконуються сучасні розробки ресурсоефективного обладнання.

### **Математичне моделювання фізичних процесів при термообробленні вуглецевмісних матеріалів у електричних печах**

З літературних джерел [14, 15] відомо, що експериментальні дослідження фізичних полів в електрокальцинаторах під час термооброблення сипкого наповнювача є надзвичайно складним завданням, що пов'язано з високим рівнем температур у робочому просторі печі, рухом та агресивністю середовища, значною тривалістю процесу тощо. Тому єдино можливим підходом до проведення досліджень електрокальцинаторів з метою підвищення їх енергосумарності може бути розумне поєднання теоретичних досліджень, що базуються на математичному моделюванні, з окремими експериментами у промислових умовах, які є необхідними для верифікації числових моделей та перевірки розроблених технічних рішень.

Моделюванню температурних та електричних полів у електрокальцинаторах присвячено праці [16, 17, 23–29]. У праці [16] наведено фізичну та математичну моделі, що описують високотемпературне оброблення нафтового коксу в електрокальцинаторі. Математична модель має такі припущення: електричне поле у печі вважають безвихровим; термоелектричними ефектами нехтують; усі матеріали приймаються ізотропними. Процес графітування нафтового коксу в шахтній однофазній електропечі описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних з використанням багатозафазної моделі Ейлера й теплоелектричного стану, що містить рівняння нерозривності, збереження кількості руху та енергії, а також рівняння квазістаціонарної електропровідності. Також наводяться відповідні початкові та граничні умови. Ця модель дає змогу теоретично досліджувати процес високотемпературного оброблення нафтового коксу в шахтній електричній печі та відпрацювати технологічний регламент пускового й робочого режимів. На жаль, у статті відсутні дані про числові дослідження фізичних полів у електрокальцинаторі при прожарювання нафтового коксу.

У праці [17] математична модель побудована на континуальному наближенні та включає такі рівняння: збереження маси та збереження кількості руху для описання динаміки сипкого матеріалу, рівняння Лапласа для описання поля електричного потенціалу в електрокальцинаторі. При цьому не наведено диференціального рівняння енергії в частинних похідних у явному вигляді. Замість цього приведено стаціонарне дискретне рівняння теплопровідності методу скінченних елементів. Також відсутні початкові та граничні умови. Зовсім відсутні дані про ефективні фізичні властивості матеріалів, що використовувалися в розрахунках. Причому динамічна в'язкість у рівнянні збереження кількості руху в тексті статті помилково підписана як кінематична в'язкість.

Для числової реалізації використані програмні продукти ANSYS [30] (ANSYS Workbench Electric Module (стаціонарний) та ANSYS CFX, або Fluent). Взагалі система теплоелектричного числового аналізу в ANSYS Workbench є стаціонарною задачею, звідки випливає, що у [17] замість нестационарної задачі використовується стаціонарна. З використанням числового моделювання розроблено вертикальний електрокальцинатор, який дає змогу отримувати високоякісний графітований кокс та електроантрацит з піковою температурою центра робочого простору 3000 °С, який було реалізовано на виробництві. Однак, судячи з розрахункової сітки [17], складно робити висновки про достовірність отримуваних результатів. На дискретизованій моделі електрокальцинатора [17] також зовсім відсутня футеровка, що додає неоднозначності під час задання граничних умов зовнішнього теплообміну тощо.

У статті [23] на основі побудованої математичної моделі теплоелектричного стану промислового електрокальцинатора з використанням методу скінченних елементів отримані результати числового моделювання з розподілу полів температури, теплового потоку, електричної (активної) потужності та електричного потенціалу. Електрокальцинатор розглядається у спрощеному вигляді як вертикальна циліндрична футерована піч, уздовж поздовжньої вісі якої розташовані два електроди (верхній та нижній). Фізичні поля отримані з розв'язання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що складається з нестационарного рівняння теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти та квазістаціонарного рівняння електричного потенціалу. Згідно з математичним формулюванням задачі, нагрівання сипкого матеріалу відбувається за рахунок джоулевої

теплоти. Однак наведені розрахунки [23] виконані без урахування руху сипкого матеріалу, зміни його маси та його нагрівання за рахунок згоряння летких, що виділяються з матеріалу, та температурної залежності фізичних властивостей матеріалів. Аналіз наведених розрахункових даних показав, що максимум температури сипкого матеріалу для дослідженої системи має місце біля робочого кінця нижнього електрода (2300–2370) °С, у той час як на торці верхнього електрода температура складає (1900–2000) °С. Отримані результати показують, що з точки зору вогнетривкості футеровки найбільш проблемною є її ділянка, що розташована біля робочого торця нижнього електрода.

У праці [24] досліджена можливість водяного охолодження електрокальцинатора з метою зниження температури стінки футеровки. Розглядається охолодження циліндричної поверхні по всій довжині печі за рахунок водяного плівкового охолодження та вільної конвекції.

У статті [25] наведено числове моделювання термічного оброблення антрациту в електрокальцинаторі типу ИЕТ-10-УХЛЧ. У праці досліджено вплив глибини занурення верхнього електрода у масу антрациту на температурне поле, напруженість електричного поля та величину й напрям векторів густини струму.

У статті [26] наведено узагальнення раніше проведених теоретичних та експериментальних досліджень на промислових електрокальцинаторах. Математична модель процесу термооброблення матеріалу, що розглядалася у попередніх роботах цих же авторів [23–25], доповнена рівняннями електродинаміки Максвелла. Визначені електричні режими електрокальцинатора під час його роботи від мережі електроживлення змінним струмом.

У працях [27, 28] наведена континуальна математична модель теплоелектричного та гідродинамічного стану електрокальцинатора типу Elkem, яка була використана для мінімізації перепаду робочих температур у радіальному напрямку та підвищення продуктивності високо-температурного агрегату.

У статті [29] розглянуто проблему оптимізації процесу високотемпературної кальцинації антрациту в електрокальцинаторах, зокрема з використанням мультифізичної числової моделі, запропонованої у [26], досліджено вплив розподілу електромагнітних та температурних полів, газового потоку та кінетики хімічних реакцій на продуктивність та тривалість експлуатації електропечі.

Головними недоліками зазначених математичних моделей фізичного стану шахтних електропе-

чей є те, що у них не враховуються такі важливі особливості процесу термооброблення, як динаміка щільного руху сипкого середовища та хімічна взаємодія за умови високих температур, а також майже відсутні дані про їх верифікацію.

Математична модель, у якій здійснена спроба мінімізувати вищевказані недоліки, наведена у праці [15], де для спрощення математичної постановки вихідної задачі та числової реалізації використано її поділ на декілька

більш простих пов'язаних між собою складових. Перша з них включає дискретний опис руху сипкого середовища у наближенні моделі дискретного елемента [31, 32], друга – перехід від дискретної до континуальної постановки з одержанням поля швидкості, що описує рух сипкого матеріалу як суцільного середовища [33], третя – зв'язана теплоелектрична задача, в якій враховується динаміка сипкого середовища завдяки наявності конвективної похідної в рівнянні енергії:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{d\tau} = m_i \mathbf{b} + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij}; \\ I_i \frac{d\omega_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^k (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}), \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (T\bar{\mathbf{V}} + \sigma(T)|\nabla u|^2 + \\ + \mathbf{q}_{v,chem}, \tau > 0; \\ \nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \tau > 0; \\ \mathbf{q} = -\lambda_{eff}(T)\nabla T, \mathbf{j} = -\sigma_{eff}(T)\nabla u, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{V}}_i = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau} \frac{\sum_{j=1}^{\ell} w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j}) v_j^*}{\sum_{i=1}^{\ell} w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j})} d\tau, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де  $m_i$  – маса частинки, кг;  $\tau$  – час, с;  $i$  – індекс частинки, відносно якої розглядається система рівнянь (1),  $\mathbf{v}_i$  – вектор лінійної швидкості центра маси частинки, м/с;  $\mathbf{b}$  – вектор масової сили, Н/кг;  $\mathbf{F}_{ij}$  – вектор зовнішньої сили, що діє на частинку  $i$  через контакт з частинкою  $j$ , Н;  $I_i$  – момент інерції, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_i$  – вектор кутової швидкості, рад/с;  $k$  – кількість частинок, що перебувають у контакті з частинкою  $i$ ;  $j$  – індекс частинки, що взаємодіє з частинкою  $i$ ;  $\mathbf{T}_{ij}$  – зовнішній крутий момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок  $i$  та  $j$ , Н·м;  $\mathbf{M}_{ij}$  – момент опору коченню, Н·м;  $\bar{\mathbf{V}}_i$  – осереднене поле швидкості в ейлеревій системі відліку, м/с;  $\tau_0$  – початковий час осереднення, с;  $\Delta\tau$  – проміжок часу осереднення швидкості, с;  $w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$  – просторова вагова функція, яка залежить від радіуса-вектора точки осереднення  $\mathbf{r}_i \in \Omega_2$  та радіуса-вектора  $\mathbf{r}_j \in \Omega_1$  частинок, що перебувають в околі  $\mathbf{r}_i$ ;  $\Omega_1$  – розрахункова область дискретної моделі, що належить до лагранжевої системи відліку;  $\Omega_2$  – розрахункова область нерозривної моделі, що належить до ейлеревій системи відліку;  $w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j})$  – вагова функція, за допомогою якої враховується варіація насипної густини частинок  $\Omega_1$ , що залежить від об'єму гранул ( $V_{gran,j}$ ), які вміщуються в об'ємі розрахункової комірки ( $V_{cell,i}$ );  $\mathbf{v}_j^* = (\mathbf{r}_j|_{\tau_0 + \Delta\tau} - \mathbf{r}_j|_{\tau_0}) / \Delta\tau$  – швидкість частинок у лагранжевій системі відліку, в якій враховується їх поступальний та обертальний рух, м/с;  $N$  – кількість розрахункових комірок, що утворюються в результаті дискретизації  $\Omega_2$ ;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);  $T$  – абсолютна температура, К;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с;  $\mathbf{q}$  – вектор густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{eff}$  – ефективна електропровідність сипкого матеріалу, (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $u$  – електричний потенціал, В;  $q_{v,chem}$  – об'ємна густина джерела теплоти від хімічних реакцій взаємодії матеріалу з повітрям за високих температур, Вт/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{j}$  – вектор густини електричного струму, А/м<sup>2</sup>;  $X(x, y, z) \in \Omega_2$  – декартові координати, м;  $\ell$  – кількість частинок, що перебувають в околі  $\mathbf{r}_i$ ;  $\lambda_{eff}$  – коефіцієнт ефективної теплопровідності сипкого матеріалу, Вт/(м·К);  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>.

Для замикання системи рівнянь (1)–(3) у [15] розглядаються відповідні початкові та граничні умови. Для числового розв'язання комплексної задачі (1)–(3) у [15] застосовуються два вільно відкритих програмних коди: LIGGGHTS [34] для задачі динаміки сипкого середовища (1) та OpenFOAM [35] для континуальної задачі (2) з використанням поля швидкості (3).

### Експериментальні дослідження промислових електрокальцинаторів

Основним показником якості термообробленого наповнювача в електрокальцинаторі, подрібненого до порошкоподібного стану, є значення його питомого електричного опору (ПЕО) при кімнатній температурі. На підставі лабораторних досліджень, наведених у [15], встановлено, що для термообробленого антрациту (або електроантрациту) ця величина має бути меншою за  $PEO_{allow} = 1000 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , яку можна досягти за мінімального значення температури прожарювання  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  тривалістю не менше 2 год. Для отримання високоякісного графітованого нафтового коксу з ПЕО  $< 150 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  мінімальна температура обробки має перевищувати  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$  тривалістю 2 год.

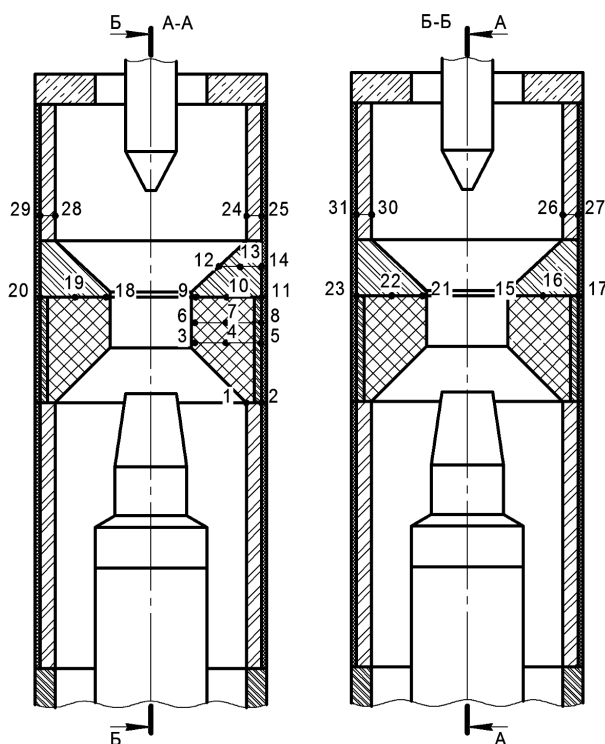


Рис.3. Схема встановлення термометричного обладнання на експериментальній кампанії електрокальцинатора [15].

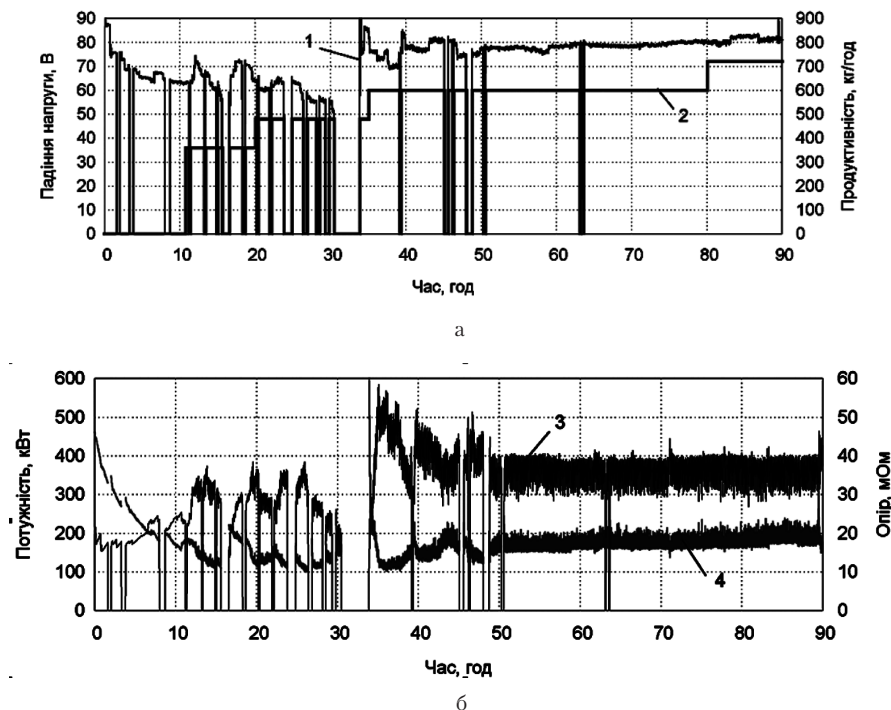


Рис.4. Параметри експериментальної кампанії електрокальцинатора за період 90 год після пуску [15]: 1 – падіння напруги; 2 – продуктивність; 3 – активна діюча потужність; 4 – повний електричний опір.

Експериментальним дослідженням електричних параметрів та температурних режимів та експлуатації футеровки промислових електрокальцинаторів під час високотемпературного оброблення антрациту й нафтового коксу присвячено роботам [14, 15, 36]. Розглянемо результати натурних досліджень експериментальної кампанії електрокальцинатора з дросель-шайбою [18] під час термооброблення антрациту. Схему проведення вимірювань температур футеровки наведено на рис.3.

При прожарюванні антрациту на електрокальцинаторі проводилися вимірювання електричних та термічних параметрів: електричної потужності, продуктивності, питомого електричного опору про-



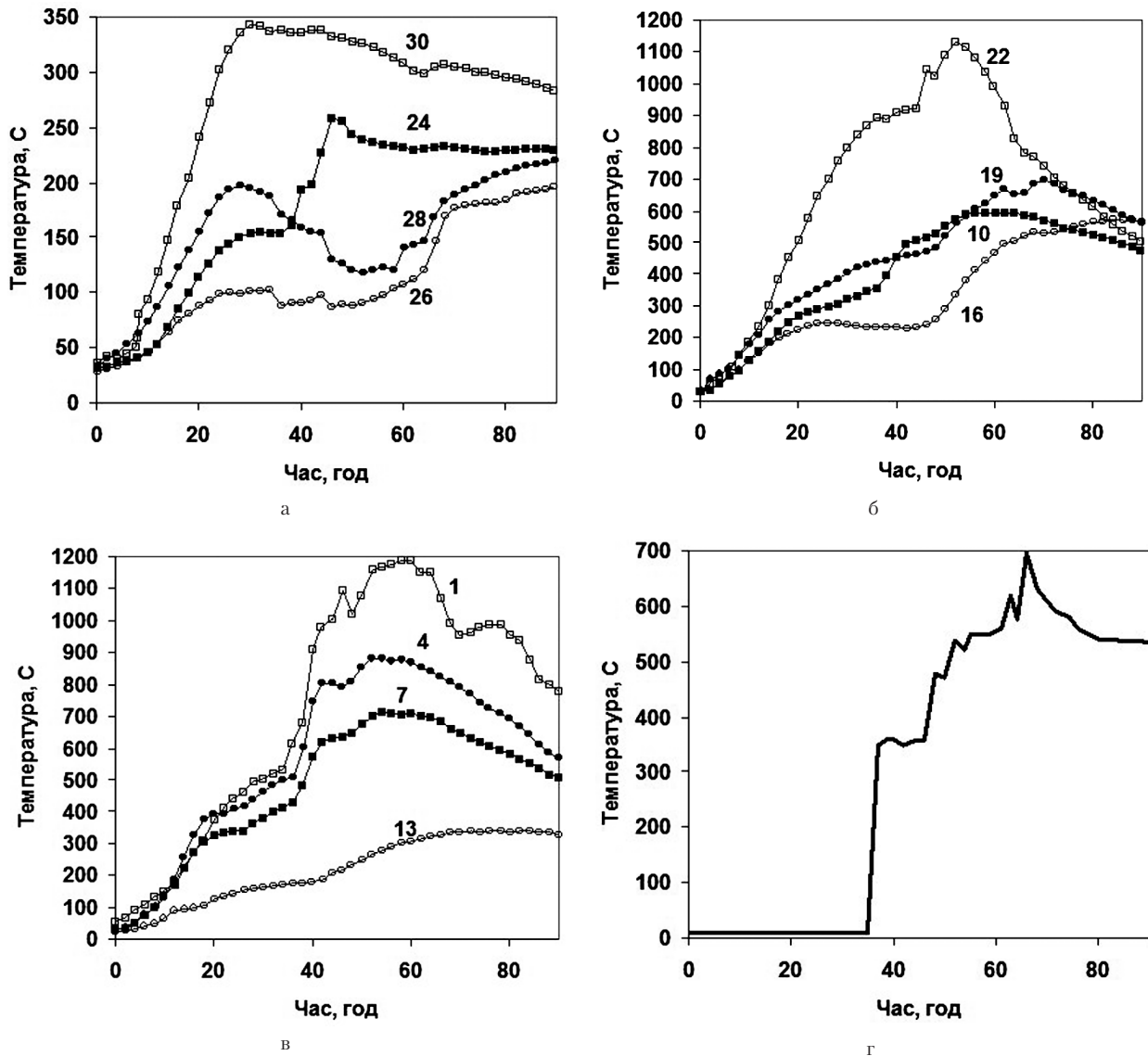


Рис.5. Температури у вимірюваних точках футеровки експериментальної кампанії електрокальцинатора за період 90 год після пуску [15]: а – розподіл температури над дросель-шайбою (т.т. 24, 26, 28, 30); б – розподіл температури у контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби (т.т. 10, 16, 19, 22); в – розподіл температури по висоті дросель-шайби (т.т. 1, 4, 7, 13); г – температура відхідних газів.

жареного антрациту, рівнів температури футеровки та відхідних газів. Результати експериментальних досліджень наведено на рис.4, 5.

Експериментальна кампанія електрокальцинатора прожарювання антрациту характеризується такими параметрами: тривалість кампанії – 750 год; тривалість пускового періоду або виходу на усталений режим роботи – 65 год; падіння напруги – (80–85) В; активна потужність – (360–420) кВт; повний електричний опір печі – (18–19) мОм; продуктивність за термообробленим антрацитом – 720 кг/год (див.

рис.4); ПЕО прожареного антрациту – (550–800) мкОм·м, що набагато менше мінімально потрібного значення 1000 мкОм·м. Таким чином, за показником ПЕО електроантрациту можна стверджувати, що під час кампанії його термооброблення температура в зоні прожарювання перевищувала 1300 °С, витримка за цієї температури становила не менше 2 год. За даними [15], похибка вимірювання температури футеровки за довірчої ймовірності 0,997 складала 3,3 %.

Аналіз експериментальних даних дає підстави зробити такі висновки:

– пусковий режим характеризується поступовим підвищенням активної електричної потужності від 200 кВт до робочого значення 400 кВт, змінним графіком вивантаження матеріалу (рис.4, а), частими відключеннями електрокальцинатора від мережі електроживлення (понад 20 разів) для виконання екстрених технологічних операцій (наприклад, переміщення верхнього електрода з метою мінімізації нерівномірності електричного та теплового полів у поперечних перерізах печі);

– експериментальні дані показують значні коливання електричних параметрів (рис.4), що пов'язано зі зміною контактної електричної опору системи (перманентної перебудови контактних пар між частинками) внаслідок руху сипкого матеріалу, спричиненого вивантаженням матеріалу з печі;

– температурне поле в електрокальцинаторі характеризується значною нерівномірністю у поперечних перерізах з яскраво вираженим перегрівом одної з його сторін (рис.5, тт. 1, 22, 30). Найбільш високий рівень температур спостерігається під дросель-шайбою, що вказує на основну зону прожарювання матеріалу в печі;

– причиною зупинки електрокальцинатора під час кампанії прожарювання антрациту є перевищення допустимої температури металевого кожуха печі у зоні під дросель-шайбою.

#### **Верифікація числової дискретно-континуальної моделі фізичного стану електрокальцинатора**

Практика застосування числових моделей для проектування промислового обладнання передусім потребує оцінки похибки розрахунків (верифікації), яку зазвичай виконують за допомогою порівнянь з точними розв'язками або експериментальними даними. У праці [15] верифікація проводилася у декілька етапів: на першому налаштування та оцінка похибки виконувалися окремо для дискретної й континуальної числових моделей; на другому — для об'єднаної дискретно-континуальної числової моделі.

Налаштування дискретної моделі статички та динаміки сипкого матеріалу з властивостями, близькими до антрациту, з використанням програмного коду LIGGGHTS виконувалося на прикладі формування кута природного укусу [22]. При цьому також визначався вплив гранулометричного складу сипкого матеріалу та ефективних коефіцієнтів тертя ковзання й кочення на формування кута природного укусу. В результаті числових експериментів було встановлено, що за умови використання однакових

сферичних частинок сипкого матеріалу з еквівалентним діаметром  $d = 4$  мм та ефективних коефіцієнтів тертя ковзання й кочення зі значеннями  $\mu_s = 0,6$ ,  $\mu_r = 0,3$  похибка визначення кута природного укусу антрациту не перевищує 3 % [22].

Для апробації програмного коду OpenFOAM проведено серію тестів на розв'язках стаціонарних та нестационарних теплоелектричних задач та їх порівняння з відповідними аналітичними та числовими розв'язками [37]. У результаті було встановлено, що похибка розрахунків лежить у межах (0,1–0,6) %.

Верифікація дискретно-континуальної числової моделі фізичних полів електрокальцинатора з урахуванням щільного руху сипкого середовища та хімічної взаємодії [15] виконувалася за вищенаведеними експериментальними даними кампанії прожарювання антрациту. За результатами зіставлення розрахунків за дискретно-континуальною числовою моделлю теплоелектричного стану електрокальцинатора з експериментальними даними [15] можна зробити такі висновки:

– числова модель теплоелектричних полів шахтної електропечі є вісесиметричною, тому в ній не враховується нерівномірність розподілу електричного струму в азимутальному напрямку та відповідно несиметричний каналізований струм, а також локальні перегріви матеріалу та їх зміна у часі;

– повний електричний опір шахтної печі відтворюється з похибкою не більше 10 % на етапі пускового періоду, коли сипкий матеріал не рухається, та не більше 14 % в усталеному режимі, що відповідає експлуатаційному періоду. Значна розбіжність між значеннями повного електричного опору електрокальцинатора у період (10–17) год з початку вивантаження матеріалу пов'язана з комплексом явищ, що не можуть бути враховані у числовій моделі [15] через інерційність руху сипкого матеріалу, оскільки матеріал в електропечі приходить до руху в об'ємі робочого простору тільки через деякий час після початку вивантажень; а також регулярні відключення від мережі електроживлення;

– температурні залежності фізичних властивостей термообробленого матеріалу значно відрізняються від сирого. Тому в числовій моделі використовуються ефективні значення фізичних властивостей сипкого наповнювача, які є характерними для сталого співвідношення сирій/оброблений матеріал, що досягається через деякий час після початку вивантажень;

– амплітуда коливань повного електричного опору електрокальцинатора, розрахованого

за допомогою числової моделі, становить  $\pm (3-6) \%$ , у той час як експериментальні значення перебувають у межах  $\pm 10 \%$ . Це можна пояснити тим, що у числовій моделі враховується лише короткочасне охолодження системи за час вивантаження дози;

– розроблена у [15] числова модель адекватно відтворює характер зміни температури в експериментальних точках футеровки та прогнозує їхні значення, що перебувають між зональними мінімумами та максимумами. Осереднена похибка розрахункових значень температури за відсутності локальних перегрівів не перевищує 17%.

### Аналіз результатів числового моделювання фізичного стану електрокальцинатора при високотемпературному обробленні наповнювача

Для розробки технічних рішень з ресурсоенергозбереження у технології виробництва наповнювача електродних виробів доцільно використовувати числове моделювання. Саме такий підхід реалізовано у праці [15] на прикладі електрокальцинатора з дросель-шайбою для термооброблення антрациту, в якій досліджено вплив зміни конструкції дросель-шайби та її геометричних параметрів (тобто типорозміру дросель-шайби), електричної потужності та продуктивності на технологічні показники роботи електрокальцинаторів та виконано розробку ефективних регламентів пуску та експлуатації.

Вплив конструкції дросель-шайби на технологічні показники роботи електрокальцинатора у [15] досліджено за допомогою серії числових експериментів на прикладі чотирьох найбільш ймовірних варіантах її конструктивного оформлення (рис.6).

При цьому для оцінки ресурсоефективності запропонованих конструкцій дросельовальних пристроїв обрано такі технологічні показники ефективності [15], результати розрахунків яких наведено у таблиці:

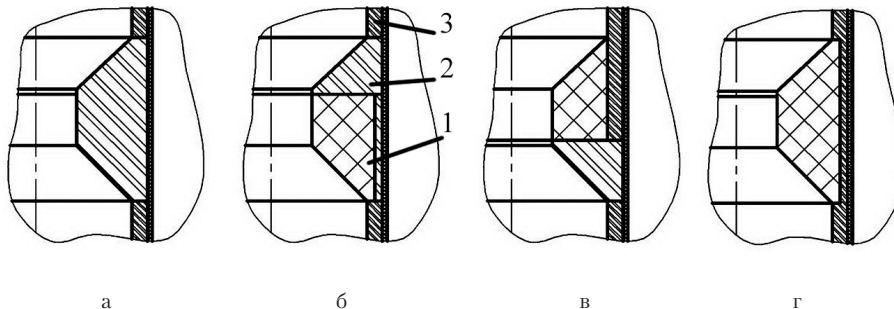


Рис.6. Конструкції дросель-шайби електрокальцинатора залежно від її матеріалу [15]: (1 – вугілля; 2 – вогнетрив; 3 – шамотна цегла) а – повністю з вогнетриву; б – зверху вугілля, знизу вогнетрив; в – зверху вогнетрив, знизу вугілля; г – повністю з

### Показники роботи електрокальцинатора при різній конструкції дросель-шайби [15]

Конструкції дросель-шайби за рис.6	$C_{q.calc}$	$C_{sh.top}$	$C_{sh.bot}$	$C_{mull.alum}$	$I_p$
а	1,0	0,0	0,074	0,005	4,0
б	0,95	0,0	0,025	0,045	5,9
в	0,81	0,003	0,224	0,18	6,3
г	0,99	0,054	0,0	0,0	8,6

–  $C_{q.calc}$  – безрозмірний коефіцієнт якості прожарювання наповнювача,  $C_{q.calc} = \text{ПЕО}_{\min} / \text{ПЕО}_{\text{allow}}$  (тут  $\text{ПЕО}_{\min}$  – мінімальне значення експериментально визначеного ПЕО матеріалу, отриманого в електрокальцинаторі;  $\text{ПЕО}_{\text{allow}}$  – допустиме або регламентоване значення ПЕО для електроантрациту,  $\text{ПЕО}_{\text{allow}} = 1000 \text{ мКОМ-м}$ );

–  $C_{sh.top}$  – безрозмірні об’ємні коефіцієнти зон шамотної футеровки з температурою понад  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  (максимальна температура застосування шамотної цегли) верхньої й нижньої частин футеровки печі,  $C_{sh.top} = V_{top 1300} / V_{sh.top}$ ,  $C_{sh.bot} = V_{bot 1300} / V_{sh.bot}$  (тут  $V_{top 1300}$ ,  $V_{bot 1300}$  – об’єм зон верхньої й нижньої частин шамотної футеровки з температурою понад  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{м}^3$ ;  $V_{sh.top}$ ,  $V_{sh.bot}$  – об’єми зон верхньої й нижньої частин шамотної футеровки,  $\text{м}^3$ );

–  $C_{mull.alum}$  – безрозмірний об’ємний коефіцієнт зони мулітокорундової футеровки з температурою  $> 1600 \text{ }^\circ\text{C}$  (максимальна температура застосування мулітокорундового вогнетриву),  $C_{mull.alum} = V_{1600} / V_{mull.alum}$  (тут  $V_{1600}$  – об’єм зони з температурою  $> 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{м}^3$ ;  $V_{mull.alum}$  – повний об’єм зони з муліто-корундовою футеровкою,  $\text{м}^3$ );

–  $I_p$  – сила робочого струму на електрокальцинаторі, кА.

З аналізу даних таблиці випливає, що за інтегральним показником, який враховує якість прожареного антрациту, температурні умови експлуатації вогнетривкої футеровки та робочу силу струму, тобто ресурсоефективність, є запатентована конструкція дросель-шайби, наведеної на рис.6, б [18].

Для дослідження впливу зміни геометричних параметрів дросель-шайби, активної електричної потужності та продуктивності на технологічні показники ефективності електрокальцинатора  $C_{q.calc}$ ,  $C_{sh.top}$ ,  $C_{sh.bot}$ ,

$C_{\text{mull.alum}}$  у [15] використана така система безрозмірних незалежних параметрів:

1) діаметр дросель-шайби

$$\bar{D} = D_{\text{др}} / D_{\text{вн}}, \quad (4)$$

де  $D_{\text{др}}$  – внутрішній діаметр дросель-шайби, м;  $D_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр робочого простору печі без дросель-шайби, м;

2) висота дросель-шайби

$$\bar{S} = (H_{\text{др}} \delta_{\text{др}}) / \max\{H_{\text{др}} \delta_{\text{др}}\}, \quad (5)$$

де  $H_{\text{др}}$  – висота дросель-шайби, м;  $\delta_{\text{др}}$  – товщина дросель-шайби, м,  $\delta_{\text{др}} = (D_{\text{вн}} - D_{\text{др}}) / 2$ ;

3) активна електрична потужність

$$\bar{P} = (P - P_{\text{min}}) / (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}), \quad (6)$$

де  $\bar{P}$ ,  $P_{\text{min}}$ ,  $P_{\text{max}}$  – поточна, мінімальна й максимальна активна електрична потужність на електрокальцинаторі відповідно, Вт;

4) відносна продуктивність

$$\bar{G} = (G - G_{\text{min}}) / (G_{\text{max}} - G_{\text{min}}), \quad (7)$$

де  $G$ ,  $G_{\text{min}}$ ,  $G_{\text{max}}$  – поточна, мінімальна й максимальна продуктивність електрокальцинатора відповідно, кг/год.

На підставі проведених числових досліджень фізичних полів електрокальцинатора під час термооброблення антрациту з конструкцією дросель-шайби (рис.6, б) було встановлено такі раціональні діапазони зміни безрозмірних незалежних параметрів [15], які можуть бути корисними для проектування дросельовальних пристроїв та режимів експлуатації печей, що забезпечують ресурсоенергоєфективність електротермічного обладнання:  $\bar{D} = 0,35-0,6$ ;  $\bar{S} = 0,14-0,38$ ;  $\bar{P} = 0,4-0,62$ ;  $\bar{G} = 0,5-0,75$ .

З використанням числового аналізу в [15] розроблено модернізований регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора з дросель-шайбою для прожарювання антрациту (рис.7). Розробка модернізованого регламенту здійснювалася за таких обмежень режимних параметрів:

- тривалість пускового періоду не більше 30 год;
- рівномірне зростання електричної потужності протягом пускового періоду;
- вивантаження матеріалу здійснюється з моменту пуску й рівномірно зростає до робочого значення з початком експлуатаційного періоду.

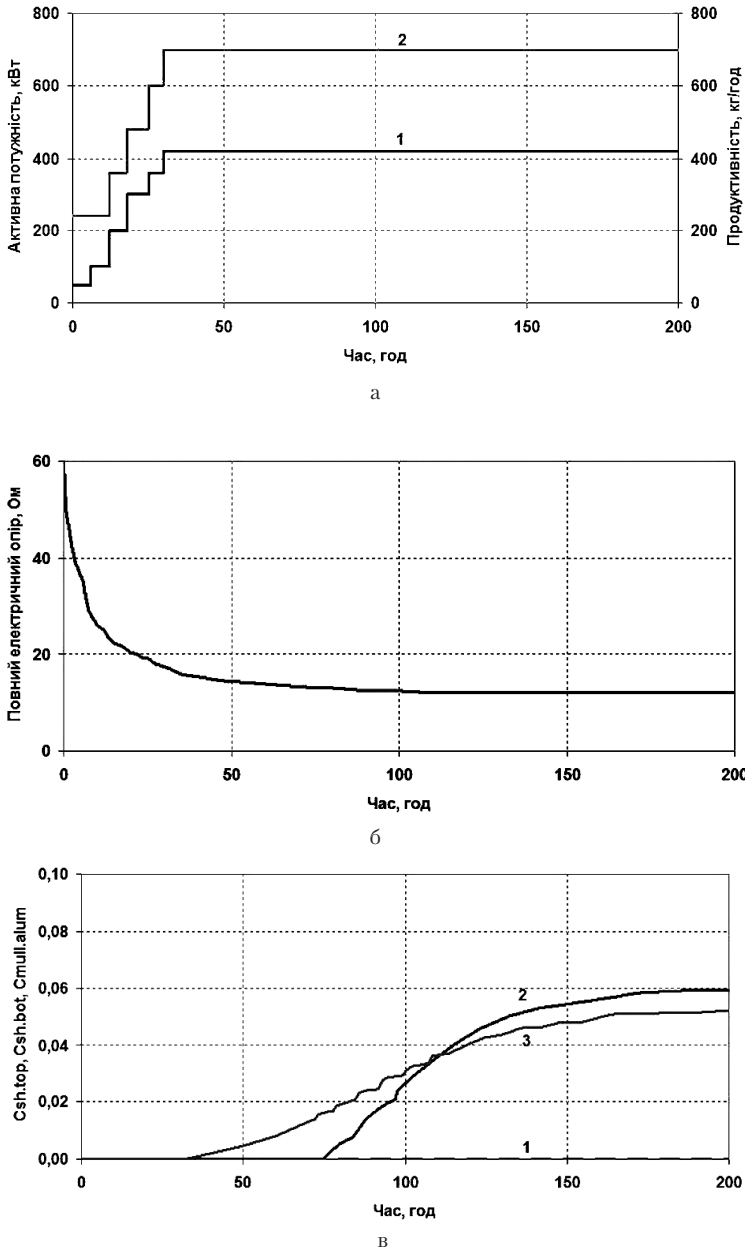


Рис.7. Розроблений регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання антрациту [15]: а – регламент пуску та експлуатації: (1 – режим підводу активної електричної потужності; 2 – режим зміни продуктивності); б – повний електричний опір; в – технологічні показники роботи: 1 –  $C_{\text{sh.top}}$ ; 2 –  $C_{\text{sh.bot}}$ ; 3 –  $C_{\text{mull.alum}}$ .

Розроблений регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для високотемпературного оброблення антрациту впроваджено на ПрАТ «Укрграфіт» (м. Запоріжжя, Україна). У результаті впровадження модернізованого регламенту ресурс роботи обладнання збільшився від 1 до 6 міс, питомі витрати електроенергії зменшилися на (50–100) кВт·год/т.

З використанням наведеної методології також виконано розробки конструкції та регламенту пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання нафтового коксу за температури понад 2200 °С, результати впровадження яких на ПрАТ «Укрграфіт» показали, що ресурс роботи збільшився від 2 діб до 1 року, питомі витрати електроенергії становили 1889 кВт·год/т. Для порівняння: класична технологія отримання графітованого наповнювача у печах Рідгамера та Ачесона сягає понад 3500 кВт·год/т [16].

Удвічі більший ресурс роботи електрокальцинатора для термооброблення нафтового коксу порівняно з електрокальцинатором для прожарювання антрациту пояснюється набагато меншою, ніж у антрациті, абразивністю коксу, що знижує швидкість зношення футеровки.

### Висновки

Експериментальні дослідження фізичних полів у електрокальцинаторах є надзвичайно складним завданням, що пов'язано з високим рівнем температур, рухом та агресивністю середовища, значною тривалістю процесу тощо. Тому єдиною можливим підходом до проведення досліджень електрокальцинаторів з метою підвищення їх ресурсо- та енергоефективності може бути розумне поєднання теоретичних досліджень, що базуються на математичному моделюванні, з окремими експериментами у промислових умовах, які є необхідними для верифікації числових моделей та перевірки розроблених технічних рішень.

На підставі критичного аналізу літературних джерел з математичного моделювання фізичних полів у електрокальцинаторах встановлено, що дискретно-континуальна модель найбільшою мірою відображає фізичні процеси, що відбуваються під час високотемпературного оброблення вуглецевмісного наповнювача в електротермічному обладнанні. Результати зіставлення експериментальних даних з розрахунковими показали відхилення останніх у межах (10–17) % для електричних параметрів та температури футеровки відповідно.

Розроблена у [15] система безрозмірних технологічних та геометричних параметрів роботи електрокальцинатора є потужним інструментом для розробки ресурсоенергоефективних технічних рішень з модернізації технології високотемпературного оброблення наповнювачів.

У результаті впровадження на ПрАТ «Укрграфіт» ресурсоенергоефективних технічних рішень з модернізації технології високотемпературного оброблення наповнювачів електродних виробів, розроблених за методологією [15], досягнуті такі показники ефективності: для електрокальцинаторів з прожарювання антрациту ресурс роботи збільшився від 1 до 6 міс, питомі витрати електроенергії зменшилися на (50–100) кВт·год/т; для електрокальцинаторів з графітування нафтового коксу ресурс роботи збільшився від 2 діб до 1 року, питомі витрати електроенергії зменшилися більше ніж на 1600 кВт·год/т порівняно з класичною технологією виробництва графітованого наповнювача у печах Рідгамера та Ачесона.

У подальшому планується відпрацювання технології одержання високоякісних карбюраторів для металургійної галузі з температурою обробки 3000 °С.

### Список літератури

1. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. и др. Производство электродной продукции. Москва : Металлургия, 1985. 129 с.
2. Кузнецов Д.М., Фокин В.П. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования. Новочеркасск : Южно-Российский гос. техн. ун-т, 2001. 132 с.
3. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. Москва : Металлургия, 1972. 432 с.
4. Кашелев И.М., Солдатов А.И., Страхов В.М. Использование каменных углей в качестве углеродистого наполнителя при изготовлении электродной массы. *Кокс и химия*. 2000. № 1. С. 20–23.
5. Сюняев З.И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса. Москва : Химия, 1973. 296 с.
6. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов. Москва : Металлургия, 1990. 238 с.
7. Чалых Е.Ф. Технология углеграфитовых материалов. Москва : Металлургиздат, 1963. 304 с.
8. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов. Москва : Металлургия, 1972. 256 с.
9. Громов Б.С., Панов Е.Н., Боженко М.Ф. и др. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров. Москва : Издат. дом «Руда и металлы», 2001. 336 с.
10. Чалых Е.Ф. Обжиг электродов. Москва : Металлургия, 1981. 116 с.

11. Marsh H. Structural changes of anthracite. *14th Bienn. Conf. on Carbon. Penns., USA*, 1979. P. 165.
12. Гасик М.И., Гриншпунт А.Г., Цибуля Е.И. та ін. Исследование газопроницаемости слоя антрацита при производстве термоантрацита в электрокальцинаторе. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 3. С. 30–33.
13. Петров Б.Ф. Энергосбережение в производстве электродного термоантрацита. Киев : Экотехнология, 2006. 144 с.
14. Панов Е.Н., Матвиенко А.А., Карвацкий А.Я. и др. Современное состояние проблемы получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2011. № 1, додаток. С. 49–55.
15. Лазарев Т.В., Карвацкий А.Я., Панов Е.М. та ін. Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах. Київ : Політехніка, 2016. 156 с.
16. Панов Е.Н., Карвацкий А.Я., Кутузов С.В. та ін. Моделирование графитования нефтяного кокса в шахтной электроречи непрерывной дії. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2011. № 1. С. 48–52.
17. Yang Y., Gong S., Ning Q., Zhou X., Zhao H. Development and Application of Electro-calciners with Increased Calcination Temperature. *Light Metals*. 2018. P. 1363–1371. doi: 10.1007/978-3-319-72284-9\_178
18. Пат. 89263 С2 Укр., МПК (2006.01) F 27 В 1/09. Піч електрокальцинації сипучого матеріалу / Б.Є.Патон, В.Й.Лакомський, Б.Ф. Петров, С.В. Кутузов, А.В.Бондаренко, С.М. Хроменков, В.В. Буряк, Л.Ф.Ревенко, В.В. Биковець; заявник і патентовласник ВАТ «Укрграфіт». — № а200803972; заявл. 31.03.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1.
19. Panov E.N., Karvatskii A.Ya., Shilovich T.B. et al. Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. Vol. 50, No. 5–6. P. 312–322. doi: 10.1007/s10556-014-9900-3
20. Гасик М.М., Уразлина О.Ю., Кутузов С.В., Гасик М.И. Прецизионные термокинетические исследования превращений в донецком антраците при прокатке его на воздухе и в аргоне в интервале температур 100–1400 °С. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 1. С. 26–30.
21. Уразлина О.Ю., Гасик М.М., Гасик М.И. Исследование физических свойств термоантрацита при высокотемпературной прокатке антрацита. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 4. С. 17–20.
22. Karvatskii A.Ya., Lazarev T.V. Evaluation of the Discrete Element Method for Predicting the Behavior of Granular Media Using Petroleum Coke as an Example. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. Vol. 50, № 3–4. P. 186–192. doi: 10.1007/s10556-014-9877-y
23. Гасик М.М., Гасик М.И., Уразлина О.Ю. Моделирование термического и электрического режимов работы электрокальцинатора при термической обработке антрацита. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 5. С. 18–23.
24. Гасик М.М., Гасик М.И., Уразлина О.Ю. Моделирование теплотехнических процессов термообработки антрацита при воздушном и пленочном охлаждении кожуха электрокальцинатора. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 6. С. 31–35.
25. Гасик М.М., Гасик М.И., Петров Б.Ф. Компьютерное моделирование и опытно-промышленное освоение технологии одностадийной прокатки антрацита в электрокальцинаторе. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 3. С. 27–30.
26. Гасик М. М., Гасик М.И., Петров Б.Ф. Математическое моделирование процесса прокаливания термоантрацит в электрокальцинаторе. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 10. С. 32–36.
27. Perron J., Bouvette J.-F., Dupuis M. Optimization of Anthracite Calcination Process in a Vertical Electric Arc Furnace. *Light Metals*. 1996. P. 597–602.
28. Hachette R., Bui R.T., Simard G. et al. A CFD Dynamic Model of the Anthracite Calciner. *Light Metals*. 1997. P. 677–687.
29. Gasik M.M., Gasik M.I. Modeling of anthracite treatment in an electrocalciner. *Modern problems of metallurgy*. 2011. Vol. 14. P. 100–108.
30. ANSYS Engineering Simulation & 3D Design Software ANSYS. — <https://www.ansys.com/>.
31. Pöschel T., Schwager T. Computational granular dynamics models and algorithms. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. 322 p.
32. Gönçü F. Mechanics of granular materials: constitutive behavior and pattern transformation. Netherlands, Enschede : Ipskamp Drukkers, 2012. 144 p.
33. Rao K.K., Nott P.R. An Introduction to Granular Flow. New York : Cambridge University Press, 2008. 490 p.
34. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. — <http://www.liggghts.com>
35. OpenFOAM — Open Field Operation and Manipulation. — <http://www.openfoam.org/>
36. Panov E.N., Karvatsky A.Ya., Shilovich I.L. et al. Physical processes modern investigation methods in power-intensive industrial equipments. *Aluminium of Siberia – 2008 : XIV Intern. conf. exhib.* (Krasnoyarsk, Sept. 10–12, 2008) : proceedings of the conference. Krasnoyarsk : Verso, 2008. P. 124–132.
37. Лазарев Т.В. Моделивання теплоелектричного стану за допомогою OpenFoam. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2013. № 1. С. 26–30.

**Панов Е.Н.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Лазарев Т.В.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Карвацкий А.Я.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Лелека С.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
**Микулёнок И.О.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Деркач В. В.<sup>3</sup>**, **Тютюнник П.А.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> **Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев**

*просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: anton@rst.kpi.ua*

<sup>2</sup> **ГП «Конструкторское Бюро «Южное» им. М.К.Янгеля», Днепр**

*ул. Криворожская, 3, 49008 Днепр, Украина, e-mail: lazarev.t.v@gmail.com*

<sup>3</sup> **Частное Акционерное Общество «Украинский графит», Запорожье**

*Северное шоссе, 20, 69600 Запорожье, Украина, e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua*

<sup>4</sup> **Запорожский национальный технический университет, Запорожье**

*ул. Жуковского, 64, 69063 Запорожье, Украина, e-mail: Altyu10@bigmir.net*

## **Современное состояние ресурсоэнергосбережения в технологии производства углеродсодержащего наполнителя электродных изделий (Обзор)**

Рассмотрены преимущества применения электрокальцинаторов для производства углеродсодержащих наполнителей электродной промышленности. Выполнен анализ конструкций электрокальцинаторов, приведены их преимущества и недостатки, описаны происходящие в них физические процессы. Проведен критический анализ теоретико-экспериментальных методов исследования физических процессов при термообработке углеродсодержащих материалов в электрических печах. На его основании сделан вывод о том, что для разработки ресурсоэнергоэффективных технических решений по модернизации технологии производства наполнителей в электрокальцинаторах необходимо разумное сочетание методов математического моделирования с отдельными экспериментальными исследованиями на промышленном оборудовании. Показано, что промышленное внедрение ресурсоэнергоэффективных технических решений по модернизации технологии производства наполнителей в электрокальцинаторах позволило получить следующие показатели эффективности: для электрокальцинаторов для прокаливания антрацита ресурс работы увеличился с 1 до 6 мес, удельные затраты электроэнергии уменьшились на (50–100) кВт·ч/т; для электрокальцинаторов для графитирования нефтяного кокса ресурс работы увеличился от 2 сут до 1 года, удельные затраты электроэнергии уменьшились более чем на 1600 кВт·ч/т по сравнению с классической технологией. *Библ. 37, рис. 7, табл. 1.*

**Ключевые слова:** электрокальцинатор, углеродсодержащий наполнитель, антрацит, нефтяной кокс, численное моделирование.

**Panov E.M.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, **Lazarev T.V.<sup>2</sup>**, Candidate of Technical Sciences, **Karvatskii A.Ya.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, **Leleka S.V.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, **Mikulionok I.O.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, **Derkach V.V.<sup>3</sup>**, **Tiutiunnik P.O.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

37, Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: anton@rst.kpi.ua

<sup>2</sup> State Enterprise «Design Office "South" named after M.K. Yangel», Dnipro 3, Krivoy Rog Str., 49008 Dnipro, Ukraine, e-mail: lazarev.t.v@gmail.com

<sup>3</sup> Private Joint-Stock Company «Ukrainian Grafite», Zaporizhzhia

20, Pivnichna highway, 69600 Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua

<sup>4</sup> Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia

64, Zhukovskiy Str., 69063 Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: Altyu10@bigmir.net

## The Current State of Resource and Energy Saving in the Technology of Production of Carbon-based Filler of Electrode Products (Review)

Advantages of application of electrocalciners to production of carboniferous fillers of the electrode industry are considered. The analysis of designs of electrocalciners is made, their advantages and disadvantages are given, and also the physical processes happening in them are described. The critical analysis of theoretical and experimental methods of research of physical processes at heat treatment of carboniferous materials in electric furnaces is carried out. It is shown that for development of resource-power effective technical solutions on modernization of the production technology of fillers in electrocalciner it is expedient to combine methods of mathematical modeling with separate pilot studies on the industrial equipment. It is shown that industrial using of resource-power effective technical solutions on modernization of the production technology of fillers in electrocalciner allows to receive the following indicators of efficiency: for anthracite calcinating electrocalciners the resource of work increased from 1 month to 6 months, and specific expenses of the electric power decreased by (50–100) kW·h/t; for graphitizing of oil coke electrocalciners the resource of work increased from 2 days till 1 year, and specific expenses of the electric power decreased more than by 1600 kW·h/t in comparison with classical technology. *Bibl. 37, Fig. 7, Tabl 1.*

**Key words:** electrocalciner, carbon filler, anthracite, petroleum coke, numerical simulation.

### References

1. Sannikov A.K., Somov A.B., Klyuchnikov V.V., Molokova T.L., Znamenskiy V.Yu. *Proizvodstvo elektrodnoy produktsii* [Processing of electrode production]. Moscow : Metallurgiya, 1985. 129 p. (Rus.)
2. Kuznetsov D.M., Fokin V.P. (2001). *Protsess grafitatsii uglernodnykh materialov. Sovremennye metody issledovaniya* [Process of a graphitization of carbon materials. Modern methods of research]. Novocherkassk : Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 132 p. (Rus.)
3. Chalykh Ye.F. (1972). *Tekhnologiya i oborudovaniye elektrodnykh i elektrougolnykh predpriyatiy* [Technology and equipment of the electrode and electrocoal enterprises]. Moscow : Metallurgiya, 432 p. (Rus.)
4. Kashaev I.M., Soldatov A.I., Strakhov V.M. (2000). *Ispolzovaniye kamennykh ugley v kachestve uglerodnogo napolnitelya pri izgotovlenii elektrodnoy massy* [Use of coals as a carbonaceous filler at production of electrode bulk]. *Koks i khimiya*, No. 1, pp. 20–23. (Rus.)
5. Syunyayev Z.I. (1973). *Proizvodstvo, oblagorazhivaniye i primeneniye neftyanogo koksa* [Processing, purification and use of oil coke]. Moscow : Khimiya, 296 p. (Rus.)
6. Chalykh Ye.F. (1990). *Oborudovaniye elektrodnykh zavodov* [Equipment of electrode plants]. Moscow : Metallurgiya, 238 p. (Rus.)
7. Chalykh Ye.F. (1963). *Tekhnologiya uglrgrafitovykh materialov* [Technology of carbon and graphite materials]. Moscow : Metallurgizdat, 304 p. (Rus.)
8. Shulepov S.V. (1972). *Fizika uglrgrafitovykh materialov* [Physics of carbon and graphite materials]. Moscow : Metallurgiya, 256 p. (Rus.)
9. Gromov B.S., Panov Ye.N., Bozhenko M.F., Vasilchenko G.N., Karvatskiy A.Ya., Shilovich I.L.



- (2001). Obzhig i pusk alyuminievykh elektrolizero [Roasting and launch of aluminum electrolyzers]. Moscow : Ruda i metally, 336 p. (Rus.)
10. Chalykh Ye.F. (1981). Obzhig elektrodov [Roasting of electrodes]. Moscow : Metallurgiya, 116 p. (Rus.)
11. Marsh H. (1979). Structural changes of anthracite. *14th Bienn. Conf. on Carbon*. Penns., USA, p. 165.
12. Gasik M.I., Grinshpunt A.G., Tsybulya Ye.I., Zatoplyayev G.M., Kutuzov S.V., Urazlina O.Yu. (2007). Issledovaniye gazopronitsayemosti sloya antratsita pri proizvodstve termoantratsita v elektrokalsinatore [Research of gas permeability of a layer of anthracite by production of thermoanthracite in an electrocalciner]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 3, pp. 30–33. (Rus.)
13. Petrov B.F. (2006). Energoberezheniye v proizvodstve elektrodnoho termoantratsita [Energysaving in production of electrode thermoanthracite]. Kyiv : Ekotekhnologiya, 144 p. (Rus.)
14. Panov E.N., Matviyenko A.A., Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Titov M.Yr., Pulinetz I.V., Lazarev T.B., Stepura P.V. (2011). Sovremennoye sostoyaniye problemy polucheniya grafitirovannogo napolnitelya elektrodnykh izdeliy v elektrokalsinatorakh [Current state of a problem of receiving the graphitized filler of electrode products in electrocalciners]. *Visnyk NTUU «KPI». Khimichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberzhennia*, No. 1, appendix, pp. 49–55. (Rus.)
15. Lazarev T.B., Karvatskii A.Ya., Panov E.N., Leleka S.V., Pedchenko A.Yu. (2016). Zakonomirnosti protsesu vysokotemperaturnogo obrobkehhia cypuchykh vugletsevykh materialiv v elektrychnykh pechakh [Regularities of process of high-temperature processing of free-flowing carbon materials in electric furnaces]. Kyiv : Politekhnika, 156 p. (Ukr.)
16. Panov E.N., Karvatskii A.Ya., Kutuzov S.V., Leleka S.V., Stepura P.V. (2011). Modeliuvannia grafituvannia naftovogo koku v shakhtnyi elektropечи neperervnoi dii [Modeling of graphitizing of oil coke in the mine electric furnace of continuous action]. *Visnyk NTUU «KPI». Khimichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberzhennia*, No. 1, pp. 48–52. (Ukr.)
17. Yang Y., Gong S., Ning Q., Zhou X., Zhao H. (2018). Development and Application of Electrocalciners with Increased Calcination Temperature. *Light Metals 2018: Annual meeting and exhibition of the Minerals, Metals and Materials Society*, pp. 1363–1371. doi: 10.1007/978-3-319-72284-9\_178
18. Pat. 89263 C2 Ukraine (2006.01), F 27 B 1/09. Bulk electrical calcination furnace. B.Ye.Paton, V.Yo.Lakomskyi, B.F.Petrov, S.V.Kutuzov, A.V.Bondarenko, S.N.Khromenkov, V.V.Buryak, L.F.Revrnok, V.V.Bykovets. a200803972; application date 31.03.08; publication date 11.01.10, bulletin No. 1. (Ukr.)
19. Panov E.N., Karvatskii A.Ya., Shilovich T.B., Lazarev T.B., Moroz A.S. (2014). Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed. *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 50, No. 5–6, pp. 312–322. doi: 10.1007/s10556-014-9900-3
20. Gasik M.M., Urazlina O.Yu., Kutuzov S.V., Gasik M.I. (2006). Pretsizionnye termokineticheskie issledovaniya prevrashcheniy v donetskom antratsite pri prokalke ego na vozdukh i v argone v intervale temperatur 100–1400 °C. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 1, pp. 26–3. (Rus.)
21. Urazlina O.Yu., Gasik M.M., Gasik M.I. (2004). Issledovaniye fizicheskikh svoystv termoantratsita pri vysokotemperaturnoy peokalke antratsita [Research of physical properties of thermoanthracite at high-temperature calcination of anthracite]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 4, 17–20. (Rus.)
22. Karvatskii A.Ya., Lazarev T.V. (2014). Evaluation of the Discrete Element Method for Predicting the Behavior of Granular Media Using Petroleum Coke as an Example. *Chemical and Petroleum Engineering*, 50 (3–4), pp. 186–192. doi: 10.1007/s10556-014-9877-y
23. Gasik M.M., Gasik M.I., Urazlina O.Yu. (2004). Modelirovaniye termicheskogo i elektricheskogo rezhimov raboty elektrokalsinatora pri termicheskoy obrabotke antratsita [Modeling of thermal and electric operating modes of an electrocalciner at heat treatment of anthracite]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 5, pp. 18–23. (Rus.)
24. Gasik M.M., Gasik M.I., Urazlina O.Yu. (2004). Modelirovaniye teplotekhnicheskikh protsessov termoobrabotki antratsita pri vzdushnom i plynochnom okhlazhdenii kozhukha elektrokalsinatora [Modeling of heat-technical processes of heat treatment of anthracite at air and film cooling of a casing of an electrocalciner]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 6, pp. 31–35. (Rus.)
25. Gasik M.M., Gasik M.I., Petrov B.F. (2006). Kompyuternoe modelirovaniye i opytno-promyshlennoe osvoineniye tekhnologii odnostadiynoy prokalke antratsita v elektrokalsinatore [Computer modeling and trial development of technology of single-stage calcination of anthracite in an electrocalciner]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 3, pp. 27–30. (Rus.)
26. Gasik M.M., Gasik M.I., Petrov B.F. (2006). Matematicheskoye modelirovaniye protsesa prokalivaniya termoantratsita v elektrokalsinatore [Mathematical modeling of thermoanthracite calcinating process in an electrocalciner]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, No. 10, pp. 32–36. (Rus.)
27. Perron J., Bouvette J. F., Dupuis M. (1996). Optimization of Anthracite Calcination Process in a Vertical Electric Arc Furnace. *Light Metals 1996: Annual meeting and exhibition of the Minerals, Metals and Materials Society*, pp. 597–602.
28. Hachette R., Bui R. T., Simard G., Perron J., Bouvette J. F., Dupuis M. (1997). A CFD Dynamic

- Model of the Anthracite Calciner. *Light Metals 1997: Annual meeting and exhibition of the Minerals, Metals and Materials Society*, pp. 677–687.
29. Gasik M.M., Gasik M.I. (2011). Modeling of anthracite treatment in an electrocalcinator. *Modern problems of metallurgy*, Vol. 14, pp. 100–108.
30. ANSYS Engineering Simulation & 3D Design Software ANSYS. — <https://www.ansys.com/>.
31. Pöschel T., Schwager T. (2005). Computational granular dynamics models and algorithms. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 322 p.
32. Göncü F. (2012). Mechanics of granular materials: constitutive behavior and pattern transformation. Published Netherlands, Enschede, Ipskamp Drukkers, 144 p.
33. Rao K.K., Nott P.R. (2008). An Introduction to Granular Flow. New York : Publ. in the USA by Cambridge University Press, 490 p.
34. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. — <http://www.liggghts.com>
35. OpenFOAM – Open Field Operation and Manipulation. — <http://www.openfoam.org/>
36. Panov E.N., Karvatsky A.Ya., Shilovich I.L., Vasilchenko G.N., Shilovich T.B., Leleka S.V., Danilenko S.V., Bilko V.V., Pulinets I.V., Chyzh A.N. (2008). Physical processes modern investigation methods in power-intensive industrial equipments. *Aluminium of Siberia – 2008 : XIV Intern. conf. and exhib.* Krasnoyarsk: Verso, 124–132.
37. Lazarev T.V. (2013). Modeliuvannia teplotnoyeh stanov za dopomohoiu OpenFoam [Modeling of a heatelectric state by means of OpenFoam]. *Visnyk NTUU «KPI». Khimichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, No. 1, pp. 26–30. (Ukr.)

Received February 11, 2019