Прилади та устаткування

УДК 662.741.3:66.041.49:620.98

DOI: 10.33070/etars.2.2020.08

Лелека С.В.¹, канд. техн. наук, **Карвацький А.Я.¹**, докт. техн. наук, проф.,
Мікульонок І.О.¹, докт. техн. наук, проф., **Витвицький В.М.¹**, аспірант,
Глухов О.М.¹, **Бондаренко О.В.²**, **Павелко О.В.²**

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

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

² ПрАТ «Український графіт», Запоріжжя

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

Підвищення енергетичної ефективності обертової печі для прожарювання вуглецевмісної сировини

Виконано аналіз традиційного енергоємного процесу прожарювання вуглецевмісної сировини, зокрема нафтового коксу, в обертових прожарювальних печах, що припускає безперервне спалювання у них природного газу. Запропоновано новий спосіб одержання прожареного (кальцинованого) нафтового коксу, який забезпечує мінімізацію витрати природного газу як палива, а отже зниження енергоємності процесу прожарювання й вартості одержуваного прожареного коксу. У запропонованому способі на початку процесу димові гази одержують спалюванням в обертовій печі природного газу, після досягнення прожареним коксом потрібної температури витрату природного газу зменшують або припиняють зовсім, а потрібну температуру прожареного коксу підтримують відповідним співвідношенням витрат навколишнього повітря й синтетичного газу, одержуваного в результаті охолодження матеріалу в обертовій печі або у барабані-охолоджувачі. Для реалізації способу обґрунтовано схему підведення повітря у зону прожарювання обертової печі із встановленням нагнітачів повітря безпосередньо на кожусі обертової печі. Показано принципову можливість реалізації запропонованого способу на обертовій печі діаметром 2×40 м з продуктивністю 10 т/год за готовим продуктом. Виконано розрахунки її основних конструктивно-технологічних параметрів. Порівняно з відомим способом запропоноване технічне рішення дає можливість знизити енергоємність, відповідно й вартість одержуваного прожареного (кальцинованого) коксу. *Бібл. 14, рис. 7.*

Ключові слова: вуглецевмісна сировина, прожарювання, обертова піч, енергетична ефективність, синтетичний газ.

Прожарювання вуглецевмісних матеріалів для подальшого одержання з них високоякісної сировини, наприклад, кальцинованого нафтового коксу, використовуюваного, зокрема, у виробництві електродної продукції для металургійної промисловості, є одним з найбільш енерго-

ємних процесів термохімічного перероблення твердого штучного та викопного палива [1–5].

Зазначений процес прожарювання вуглецевмісної сировини у виробничих масштабах зазвичай здійснюють в обертових прожарювальних печах. Для цього в обертову піч з її «хо-

лодного» кінця подають призначений для прожарювання вихідний (зелений) нафтовий кокс, назустріч якому пропускають димові гази, одержувані спалюванням в обертовій печі природного газу, а прожарений (кальцинований) кокс видаляють з обертової печі з боку її «гарячого» кінця [1].

Недоліком відомого процесу є його висока енергоємність, оскільки протягом усього процесу прожарювання нафтового коксу його обробляють димовими газами, одержуваними в результаті неперервного спалювання в обертовій печі природного газу та частки прожарюваної вуглецевмісної сировини. Інтенсивне згоряння прожарюваної сировини відбувається в зонах прожарювання та охолодження обертової печі.

У процесі проведення досліджень запропонований новий спосіб одержання прожареного (кальцинованого) нафтового коксу, який забезпечує мінімізацію витрати природного газу як палива, а отже й зниження енергоємності процесу прожарювання й вартості одержуваного прожареного коксу.

У запропонованому способі, на відміну від відомого способу прожарювання нафтового коксу, на початку процесу димові гази одержують спалюванням в обертовій печі природного газу, після досягнення прожареним коксом потрібної температури витрату природного газу зменшують або припиняють взагалі, а потрібну температуру прожареного коксу підтримують відповідним співвідношенням витрат навколишнього повітря й синтетичного газу, одержуваного в результаті охолодження матеріалу в обертовій печі або в барабані-охолоджувачі [6].

У запропонованому способі димові гази, одержувані спалюванням в обертовій печі природного газу, використовують лише на початку процесу до досягнення прожарюваним коксом температури 1200–1300 °С. Після цього, як уже було зазначено, витрату природного газу зменшують або припиняють зовсім, а потрібну температуру прожарюваного коксу підтримують одним з таких способів:

1) відповідною витратою в обертовій печі навколишнього повітря саме в зоні прожарювання, яке йде на спалювання певних компонентів нагрітого до температури 600–1300 °С прожарюваного коксу. Таким чином досягається зменшення інтенсивності горіння прожарюваної сировини в зоні охолодження обертової печі та суттєво підвищується регульованість процесом прожарювання;

2) відповідною витратою в обертовій печі горючого синтетичного газу, одержуваного в результаті охолодження за межами обертової печі

прожареного в ній коксу; зазначений синтетичний газ містить такі горючі компоненти, як H_2 , CO , CH_4 та ін., які після надходження в обертову піч згоряють та підтримують потрібну температуру 1200–1300 °С прожарюваного коксу;

3) комбінацією описаних у попередніх двох пунктах способів, тобто відповідною витратою в обертовій печі навколишнього повітря та синтетичного газу, що зменшує витрати прожарюваної сировини.

Порівняно з відомим способом пропонується технічне рішення дає можливість знизити енергоємність та відповідно вартість одержуваного прожареного (кальцинованого) коксу.

Мета проведених досліджень — вибір схеми підведення повітря в зону прожарювання обертової печі, а також конструктивно-технологічних параметрів проведення вдосконаленого процесу одержання прожареного нафтового коксу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- вибрати раціональну схему підведення повітря у зону прожарювання обертової печі;

- визначити висоту розташування сопел для підведення повітря у піч відносно внутрішньої поверхні печі;

- визначити витрату повітря, необхідного для забезпечення заданої продуктивності печі, за рахунок згоряння компонентів оброблюваної сировини й відсутності подачі у піч природного газу;

- здійснити вибір нагнітачів повітря, схеми підведення до них електроенергії, а також глибини розрідження з боку «гарячого» кінця обертової печі з урахуванням подачі повітря в зону прожарювання.

Розглянемо дві схеми підведення повітря у зону прожарювання обертової печі. Перша з них передбачає встановлення нагнітачів повітря безпосередньо на обертовому кожусі печі (рис.1, а), друга забезпечує подачу повітря від стаціонарно встановлених нагнітачів повітря біля печі й передбачає наявність додаткової стаціонарно встановленої обичайки ззовні кожуха печі, яка утворює повітряну ємність навколо обертового кожуха печі з надлишковим тиском (рис.1, б).

Безсумнівною перевагою першої схеми є низький гідравлічний опір та рівномірність подачі повітря у зону прожарювання печі, недоліком є складність вузла підведення електроенергії до нагнітачів повітря, змонтованих безпосередньо на обертовій печі.

Перевагою другої схеми є простота конструкції вузла підведення електроенергії до нагнітачів повітря, нерухомо встановлених поза обертовою піччю, недоліками є необхідність на-

Рис.1. Схеми підведення повітря в зону прожарювання обертової печі за пропонованим способом: а — перша схема; б — друга схема; ЗП — зона прожарювання.

явності додаткової обичайки на печі з утворенням кільцевого проміжку з кожухом печі, втрата напору повітря у зазначеному кільцевому проміжку, а також складність забезпечення рівномірності подачі повітря у зону прожарювання печі.

Після ретельного аналізу переваг та недоліків зазначених схем підведення повітря безпосередньо у зону прожарювання обертової печі було обрано першу схему як більш ефективну з точки зору процесу одержання прожареного нафтового коксу в умовах діючого виробництва.

Подальший аналіз конструктивно-технологічних параметрів проведення процесу одержання прожареного нафтового коксу виконано для печі № 5 ПрАТ «Укрграфіт» (м. Запоріжжя, Україна) з такими параметрами:

Продуктивність, кг/год	—	10000
Внутрішній діаметр, м	—	1,96
Довжина, м	—	40,51
Кут нахилу печі	—	2°
Частота обертання печі, об./хв	—	1,65
Насипна щільність матеріалу, що прожарюється, кг/м ³	—	700
Кут внутрішнього тертя матеріалу, що прожарюється	—	40

У результаті проведених розрахунків отримано такі конструктивно-технологічні параметри проведення процесу одержання прожареного нафтового коксу:

— висота сопел для подавання додаткового повітря у зону прожарювання печі, що унеможливає потрапляння у них частинок прожарюваного матеріалу, склала 0,445 м;

— об'ємна витрата повітря, необхідна для забезпечення заданої продуктивності печі за рахунок згоряння вуглецю прожарюваного матеріалу (та виключення подачі для спалювання природного газу), становить 14187 м³/год.

Як нагнітачі повітря було обрано два вентилятори ОЦ 14-46 № 4 (продуктивність кожного 8000 м³/год) з електродвигунами АИР 112 МА6 (потужність 3 кВт, частота обертання ротора 1000 об./хв).

Для підведення змінного трифазного струму до електродвигунів вентиляторів було роз-

роблено схему, що містить встановлювані на кожусі печі електричні ізолятори, а також закріплені на них електроконтактні ламелі, виготовлені у вигляді кільцевих пластин з міді або латуні. При цьому підведення електроенергії від мережі до ламелей здійснюється за допомогою графітових або мідно-графітових щіток.

Об'єм газів, що відходять з печі, визначено на основі теплового балансу печі за умови, що процес прожарювання відбувається: а) винятково за рахунок спалювання оброблюваного матеріалу — 25435 м³/год; б) за рахунок спалювання оброблюваного матеріалу та з урахуванням водяної пари — 25931 м³/год (з витратою 400 кг/год, який подається у гарячу головку печі й необхідний для генерування синтетичного газу), що незначно збільшує витрату газів, які відходять, порівняно з варіантом без подавання водяної пари.

Одним з найбільш складних питань, пов'язаних з експлуатацією елементів печі в умовах високої температури, виявилось конструктивне оформлення вузла введення повітря у зону прожарювання печі. У цьому зв'язку було розглянуто кілька можливих варіантів зазначеного вузла:

1) схема з поздовжнім подаванням повітря без внутрішніх сопел (жарових труб) з установленням захисних сіток для часткового обмеження просипання матеріалу у повітряпідвідні патрубки;

2) схема з коловим подаванням повітря без внутрішніх жарових труб з установленням захисних сіток для часткового обмеження просипання матеріалу у повітряпідвідні патрубки;

3) схема з поздовжнім подаванням повітря з внутрішніми жаровими трубами, захищеними керамічним покриттям (гарнісажем).

Варіант схеми з коловим подаванням повітря було відкинуто з подальшого розгляду, оскільки у разі аварійної зупинки печі й припинення подавання повітря гарячий матеріал може потрапити у повітряпідвідні канали через руйнування захисних сіток під впливом високої температури у нижній частині печі.

Варіант з поздовжнім подаванням повітря без жарових труб позбавлений цього недоліку,

оскільки відповідним поворотом печі повітряпідвідні канали можна перевести у горизонтальне положення, за якого виключається ймовірність просипання гарячого матеріалу в повітряний колектор.

Найбільш прийнятною є схема з поздовжнім подаванням повітря з внутрішніми жаровими трубами. У цьому разі під час аварії й припинення подавання повітря вимоги до орієнтації повітряпідвідних каналів за цією схемою менш критичні, ніж у попередньому варіанті.

Для дослідження динаміки сипучого матеріалу в робочому просторі обертової печі з безпосереднім подаванням повітря у зону прожарювання, але без застосування жарових труб та без наявності захисних сіток повітряних каналів було виконано числове моделювання цього процесу без урахування впливу руху повітря для двох варіантів конструкції повітряпід-

відних патрубків (без та з наявністю равлика у повітряпідвідній системі) [7]. Результати числового моделювання динаміки сипучого середовища в обертовій печі з безпосереднім подаванням повітря у зону прожарювання, але без застосування жарових труб, виконаного за допомогою вільно відкритого програмного забезпечення LIGGGHTS [8], наведено на рис.2. Візуалізація результатів розрахунків, наведених на рис.2, виконана з використанням вільно відкритого коду ParaView [9].

Результати аналізу отриманих даних (див. рис.2) показують, що наявність равлика у повітряпідвідній системі дає можливість виключити потрапляння й нагромадження матеріалу в повітряному колекторі порівняно з варіантом без неї. Недоліком конструкції з равликом є складність її виготовлення, а також збільшення габаритів печі.

Як матеріал для виготовлення захисних сіток та жарових труб можна застосувати жароміцну сталь.

Фотознімок робочого простору обертової печі з подаванням повітря у зону прожарювання [10] разом з легендою кольорних температур показаний на рис.3.

З рис.3 видно, що установка жарових труб приводить до локального зниження температури безпосередньо труб, футерівки, а також шару прожарюваного матеріалу. Це пов'язано з рухом холодної маси повітря, що виходить із жарових труб. На поверхнях жарових труб у процесі експлуатації печі, як видно, наявний шар гарнісажу (можливо золи), але не шар вогнетриву, накладеного у період монтажу футеровки.

Також з аналізу рис.3 можна зробити такі висновки з оцінки температурних умов у робочому просторі обертової печі з жаровими трубами для подавання вторинного повітря крізь її бокові стінки: рівень температур у зонах установки труб приблизно становить безпосередньо на поверхнях труб — 580–730 °С, на поверхні футеровки обичайки — 730–800 °С, на поверхні матеріалу — 730–900 °С; рівень температур у зоні прожарювання — 900–1300 °С.

Також можна припустити три можливі варіанти формування гарнісажу на внутрішніх жарових трубах для подавання повітря:

1) на етапі монтажу футерівки печі сталева труба певної довжини й діаметра кріпиться до металевої обичайки печі, гарнісаж на трубі утворюється у період експлуатації печі за рахунок проходження крізь неї холодного повітря;

2) на етапі монтажу футерівки печі сталева труба певної довжини й діаметра, попередньо вкрита шаром розчину вогнетривкового мате-

Рис.2. Послідовність руху сипучого матеріалу в обертовій печі (а–е) з наявністю равлика в повітряпідвідній системі, але за відсутності внутрішніх жарових труб для подачі повітря та захисних сіток повітряних каналів.

Рис.3. Фотознімок робочого простору обертової печі з подаванням повітря у зону прожарювання (а) [10] разом з легендою кольорних температур (б).

ріалу для захисту від впливу високих температур, кріпиться до металевої обичайки печі, у процесі експлуатації печі вогнетривкий матеріал прожарюється та на його поверхні утворюється гарнісаж;

3) на етапі монтажу футеровки печі формуються тільки канали у футерівці, в яких внаслідок руху холодного повітря поступово утворюється труба гарнісажу.

У процесі експлуатації обертової печі за першими двома варіантами формування гарнісажу на внутрішніх жарових трубах їхня сталева основа згодом може повністю окиснитися (навіть частково оплавитися) та у результаті залишиться тільки їхня гарнісажна частина (покриття).

Для оцінки температурних умов роботи сталеві основи жарових труб та захисної сітки у пропонованій конструкції обертової печі з метою вибору необхідної марки сталі було виконано відповідні тепло-гідродинамічні розрахунки на основі математичної моделі, наведеної в [11]. При цьому було запропоновано використовувати дві тепло-гідродинамічні моделі замість значно більш складної однієї: перша з моделей стосується каналу холодного повітря, утвореного внутрішнім простором жарової труби (рис.4, а) та є вісесиметричною двовимірною, а друга є частиною робочого простору печі з жаровою трубою, що проходить вздовж її діаметра (рис.4, б) та є тривимірною, у якій разом з конвективним теплообміном також враховується радіаційний теплообмін. Для двовимірної вісесиметричної моделі або задачі (див. рис.4, а) беремо такі граничні умови:

— на вході задані температура (20 °C) й швидкість потоку повітря (26 м/с);

— на виході задані нульовий тиск та температура димових газів у печі поблизу жарової труби, визначена з розв'язку другої моделі;

— на торці труби, що перебуває у контакті з металевим барабаном печі, задана температура стінки (50–100 °C);

— на зовнішній поверхні труби (гарнісажу) та іншому її торці задані умови конвективного типу: коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні труби й температура газів у печі біля жарової труби, визначена з розв'язку другої моделі.

Для тривимірної моделі або задачі (див. рис.4, б) беремо такі граничні умови:

— на вході задані середня температура (900 °C) по поперечному перерізу й швидкість потоку димових газів (2,4 м/с);

— на виході задані нульовий тиск та температура відхідних газів;

— на поверхні обичайки печі задані граничні умови конвективного типу з навколишнім середовищем;

— на поверхні жарової труби (гарнісажу) задані середня температура потоку й коефіцієнт тепловіддачі, визначений з розв'язку першої задачі.

Властивості газів та матеріалів, використуваних для розв'язання зазначених задач:

— повітря — густина, масова ізобарна теплоємність та коефіцієнт теплопровідності беруть за температури 20 °C;

— димові гази — густина, масова ізобарна теплоємність та коефіцієнт теплопровідності беруть за температури 900 °C;

— коефіцієнт теплопровідності для сталі — 40 Вт/(м·K), для вогнетриву (гарнісажу) — 2–5 Вт/(м·K).

Рис.4. Тепло-гідродинамічні моделі елементів обертової печі: а — канал, утворений внутрішнім простором жарової труби; б — частина робочого простору печі з діаметральною жаровою трубою.

Сформульована проблема розв'язується за методом послідовних наближень між розв'язками двох задач. Критерієм одержання розв'язку є середня температура сталевій основі жарової труби, визначена із заданою точністю.

Числова реалізація сформульованої задачі виконана з використанням вільно відкритого програмного коду OpenFoam [12, 13], візуалізація — у середовищі ParaView [9]. Розра-

хунки проводилися як за умови відсутності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарової труби, так і за умови його наявності. Результати розрахунків наведені на рис.5, 6. Похибка визначення середньої температури стінки труби склала 0,19–7,40 %.

На рис.6, б середня та максимальна температури стінки сталевій труби отримані з використанням закону Фур'є.

Рис.5. Результати розрахунків тепло-гідродинамічного стану обертової печі з установленням жарових труб для подавання повітря у зону прожарювання (варіант за умови відсутності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні труби): а, б — двовимірні моделі; в, г — тривимірні моделі; а, в — поле результуючої швидкості потоку; б, г — поле температур; (б — 524 °С; г — 525 °С) — середня температура стінки сталевій труби; (б — 571 °С; г — 559 °С) — максимальна температура стінки сталевій труби.

Рис.6. Результати розрахунків тепло-гідродинамічного стану оберткової печі з установленням жарових труб для подавлення повітря у зону прожарювання (варіант за умови наявності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні труби зі стінкою завтовшки 20 мм): а — двовимірна модель; б — тривимірна модель; а, б — поле температур; (а — 393 °С; б — 364 °С) — середня температура стінки сталеві труби; (а — 447 °С; б — 417 °С) — максимальна температура стінки сталеві труби.

Аналіз розрахунків показує:

- наявність вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарові труби завтовшки ≥ 20 мм знижує її максимальну температуру на 125–140 °С у порівнянні з варіантом незахищеної труби, що знижує вимоги до вибору марки сталі;

- за відсутності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарові труби її максимальна температура досягає 571 °С. У цьому разі можливо застосовувати сталь з температурою тривалого застосування 600 °С, наприклад, 12Х18Н10Т;

- за наявності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарові труби завтовшки ≥ 20 мм її максимальна температура досягає 447 °С. У цьому разі можливо застосовувати сталь з температурою тривалого застосування 500 °С, наприклад, 20Х13 [14].

Згадані розрахунки були проведені для випадків, коли внутрішні жарові труби контактують виключно з газовим середовищем. Однак на практиці за рахунок обертання печі жарові труби будуть по черзі контактувати з газовим середовищем печі та з сипучим прожарюваним

матеріалом, що буде впливати на зміну інтенсивності теплообміну між трубами й середовищем контакту. Для оцінки цього впливу обмежитися тільки розв'язками задач стаціонарної теплопровідності не представляється можливим. Тому необхідно перейти до розв'язання нестационарної задачі теплопровідності, у якому можна врахувати циклічну зміну контактуючих з жаровими трубами середовищ у часі.

Для розв'язання такої задачі було розроблено відповідну числову модель нестационарної теплопровідності для четвертої частини жарові труби й визначено параметри зміни граничних умов конвективного типу у часі.

Для визначення часу контакту жарових труб з газовим та сипучим середовищем за рахунок обертання печі були використані такі вихідні дані: частота обертання печі — 1,65 об./хв; кут сегмента перетину печі, заповненого прожарюваним матеріалом, — 106,8°.

Виходячи з наведених даних було визначено такі величини, необхідні для проведення розрахунків: період одного оберту барабана печі складає ≈ 37 с, час контакту з газовим середовищем ≈ 26 с, час контакту із сипучим матеріалом ≈ 11 с.

Також було прийнято, що у разі контакту жарові труби із сипучим середовищем значення коефіцієнта тепловіддачі збільшується у 5 разів порівняно зі значенням коефіцієнта тепловіддачі за контакту з газовим середовищем, визначеним з розв'язку розглянутих тепло-гідродинамічних задач.

Результати розрахунків наведено на рис.7.

Аналіз результатів розрахунків показує:

- за наявності захисного шару гарнісажу на жаровій трубі рівень її середньої температури

Рис.7. Зміна середньої температури стінки жарові труби без гарнісажу й за умови його наявності у часі за результатами розв'язку нестационарної задачі з урахуванням зміни типу контакту труби з газового середовища на прожарюваний матеріал: 1 — без гарнісажу; 2 — з гарнісажем 20 мм.

майже не залежить від зміни її контакту з газового середовища на прожарюваний матеріал (див. рис.7, лінія 2), у той час як за відсутності гарнісажу цей вплив може перевищувати 100 °С;

— за наявності захисного шару вогнетриву на жарових трубах товщиною не менш 20 мм як матеріал для їх виготовлення можна використувати сталь 20Х13.

Висновки

Обґрунтовано схему підведення повітря у зону прожарювання обертової печі з установленим нагнітачем повітря безпосередньо на кожусі обертової печі, перевагою якої є відсутність втрат напору повітря, а також рівномірність його подачі у зону прожарювання печі.

Показано принципову можливість використання двох схем для безпосереднього подавання повітря у зону прожарювання обертової печі (зокрема печі діаметром 2 × 40 м з продуктивністю 10 т/год за готовим продуктом): схеми з поздовжнім подаванням повітря без внутрішніх сопел (жарових труб) з установленим захисних сіток для часткового обмеження потрапляння прожарюваного матеріалу у повітропідвідні патрубки; схеми з поздовжнім подаванням повітря із внутрішніми жаровими трубами, захищеними керамікою (гарнісажем).

Виконано розрахунки основних конструктивно-технологічних параметрів модернізованої обертової печі з подаванням повітря у зону прожарювання.

Виконано аналіз температурних умов обертової печі фірми Rain CII [10] з подаванням вторинного повітря у зону прожарювання, у результаті якого було оцінено рівень температури у зоні подавання повітря й запропоновано три варіанти формування гарнісажу на внутрішніх жарових трубах для подавання повітря.

На основі розроблених числових моделей тепло-гідродинамічного стану модернізованої обертової печі виконано розрахунки температурних умов роботи сталевих жарових труб. Аналіз проведених розрахунків дав можливість здійснити обґрунтований вибір матеріалу жарових труб.

Список літератури

1. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. М. : Металлургия, 1972. 432 с.
2. Пулинец И.В., Панов Е.Н., Карвацкий А.Я. и др. Теплообмен в многокамерных печах обжига угле-

- графитовых изделий. Київ : НТУУ «КПИ», 2014. 175 с.
3. Лелека С.В., Панов Е.Н., Карвацкий А.Я. и др. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Ачесона. Київ : НТУУ «КПИ», 2014. 238 с.
4. Панов Є.М., Лазарев Т.В., Карвацький А.Я. та ін. Сучасний стан ресурсоенергозбереження у технології виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів (Огляд). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 1. С. 17–31. doi: 10.33070/etars.1.2019.02.
5. Чирка Т.В., Васильченко Г.М., Панов Е.Н. та ін. Фізичні властивості вуглецевих силових матеріалів. Київ : НТУУ «КПИ», 2016. 152 с.
6. Пат. 139897 У Україна, МПК (2006.01) С 10 L 9/08. Спосіб одержання прожареного нафтового коксу. Є.М. Панов, А.Я.Карвацький, І.О.Мікульонюк, С.В.Лелека, О.В.Бондаренко, А.В.Вагін, О.В.Тютюнник ; заявник і патентовласник ПАТ «Укрграфіт». № u201907630; заявл. 08.07.19; опубл. 27.01.20, Бюл. № 2.
7. Глухов О.В., Карвацький А.Я., Мікульонюк І.О., Лелека С.В. Модернізація пристрою для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі // *X Всеукр. наук.-практ. конф. «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та накувальної техніки»* (Київ, 12–13 груд. 2019 р.). Київ : НЕУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. С. 5–6.
8. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. URL: — <http://www.liggghts.com> (дата доступу 28.01.2020).
9. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. URL: — <http://www.paraview.org/> (дата доступу 28.01.2020).
10. Presentation Carbon Raw Materials for the Aluminum Industry by Les Edwards, Rain CII Carbon // Metal Bulletin 30th International Aluminum Industry Conference. URL: — <https://is.gd/5XdQ85> (дата доступу 28.01.2020).
11. Panov Y., Karvatskii A., Leleka S., Lazarev T., Pedchenko A. Shock wave-boundary layer interactions at the supersonic flow around threedimensional configurations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 5, № 4. P. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2015.50911.
12. OpenFOAM — Open Field Operation and Manipulation. — URL: <http://www.openfoam.org/> (дата доступу 28.01.2020).
13. Карвацький А.Я., Пулинец И.В., Педченко А.Ю., Лазарев Т.В. Численное моделирование сверхзвуковых течений с применением открытого программного кода OpenFOAM. *Космична наука і технологія*. 2015. Т. 21, № 2. С. 47–52.
14. Андреев И.А., Зубрий О.Г., Мікульонюк І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни. Київ : Ін-т змісту і методів навчання, 1999. 148 с.

Надійшла до редакції 26.02.20

Лелека С.В.¹, канд. техн. наук, **Карвацкий А.Я.¹**, докт. техн. наук, проф.,
Микулёнок И.О.¹, докт. техн. наук, проф., **Витвицкий В.М.¹**, аспирант,
Глухов А.М.¹, **Бондаренко О.В.²**, **Павелко А.В.²**

¹*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», Київ*

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

²*ЧАО «Український графіт», Запоріжжя*

Северное шоссе, 20, 69600 Запоріжжя, Україна, e-mail: bondarenko@ukrgrafit.com.ua

Повышение энергетической эффективности вращающейся печи для прокаливания углеродсодержащего сырья

Выполнен анализ традиционного энергоемкого процесса прокаливания углеродсодержащего сырья, в частности, нефтяного кокса во вращающихся обжиговых печах, предполагающего непрерывное сжигание в них природного газа. Предложен новый способ получения прокаленного (кальцинированного) нефтяного кокса, который обеспечивает минимизацию затраты природного газа как топлива, а следовательно, снижение энергоемкости процесса прокаливания и стоимости получаемого прокаленного кокса. В предлагаемом способе в начале процесса дымовые газы получают сжиганием во вращающейся печи природного газа, после достижения прокаленным коксом необходимой температуры расход природного газа уменьшают или прекращают вовсе, а необходимую температуру прокаленного кокса поддерживают соответствующим соотношением расходов окружающего воздуха и синтетического газа, получаемого в результате охлаждения материала во вращающейся печи либо в барабане-охладителе. Для реализации способа обоснована схема подвода воздуха в зону прокаливания вращающейся печи с установкой нагнетателей воздуха непосредственно на кожухе вращающейся печи. Показана принципиальная возможность реализации предложенного способа на вращающейся печи диаметром 2×40 м с производительностью 10 т/ч по готовому продукту. Выполнен расчет ее основных конструктивно-технологических параметров. По сравнению с известным способом предлагаемое техническое решение позволяет снизить энергоемкость и, следовательно, стоимость получаемого прокаленного (кальцинированного) кокса. *Библ. 14, рис.7.*

Ключевые слова: углеродсодержащее сырье, прокаливание, вращающаяся печь, энергетическая эффективность, синтетический газ.

Leleka S.V.¹, Candidate of Technical Sciences, **Karvatskii A.Ya.¹**, Doctor of Technical Sciences, Professor, **Mikulionok I.O.¹**, Doctor of Technical Sciences, Professor, **Vytvytskyi V.M.¹**, Graduate Student, **Glukhov O.M.¹**,
Bondarenko O.V.², **Pavelko O.V.²**

¹*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

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

²*PJC «Ukrainsky Grafyt», Zaporizhzhia*

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

Improving the Energy Efficiency of a Rotary Kiln for Calcining Carbon-Containing Raw Materials

An analysis is made of the traditional energy-intensive process of calcining carbon-containing raw materials, in particular petroleum coke, in rotary kilns, which assumes continuous burning of natural gas in these furnaces. A new method for producing calcined

petroleum coke is proposed, which minimizes the cost of natural gas as fuel, and therefore reduces the energy intensity of the calcination process and the cost of the obtained calcined coke. In the proposed method, at the beginning of the process, flue gases are obtained by burning natural gas in a rotary kiln, after the calcined coke reaches the required temperature, the consumption of natural gas is reduced or stopped altogether, and the required temperature of the calcined coke is maintained by the corresponding ratio of the flow rate of ambient air and synthetic gas obtained by cooling the material in a rotary kiln or in a cooler drum. To implement the method, a scheme of air supply to the calcination zone of a rotary kiln with the installation of air blowers directly on the casing of a rotary kiln is justified. The fundamental possibility of implementing the proposed method on a rotary kiln $\varnothing 2 \times 40$ m with a capacity of 10 t/h for the finished product is shown. In particular, the calculation of its main structural and technological parameters has been performed. Compared with the known method, the proposed technical solution allows to reduce the energy intensity and, accordingly, the cost of the obtained calcined coke. *Bibl. 14, Fig. 7.*

Key words: carbon-containing raw materials, calcination, rotary kiln, energy efficiency, synthesis gas.

References

1. 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.)
2. Pulinets I.V., Panov Ye.N., Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Lazarev T.V., Chirka T.V. (2014). Teploobmen v mnogokamernykh pechakh obzhiga uglegrafitovykh izdeliy. [Heat exchange in multichamber furnaces of roasting of carbon and graphite products]. Kyiv : NTUU «KPI», 175 p. (Ukr.)
3. Leleka S.V., Panov Ye.N., Karvatskii A.Ya., Pulinets I.V., Chirka T.V., Lazarev T.V. (2014). Teploenergeticheskoye sostoyaniye pechey grafitirovaniya Achesona. [Heatelectric condition of Acheson graphitizing furnaces]. Kyiv : NTUU «KPI», 238 p. (Ukr.)
4. Panov E.M., Lazarev T.V., Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Mikulionok I.O., Derkach V.V., Tiutiunnik P.O. (2019). [The current state of resource and energy saving in the technology of production of carbon-based filler of electrode products (Review)]. *Energotehnologii i Resursoberezhenie. [Energy Technologies & Resource Saving]*, No. 1, pp. 17–34. doi.org/10.33070/etars.1.2019.02.
5. Chirka T.V., Vastlchenko G.M., Panov E.M., Leleka S.V., Karvatskii A.Ya. (2016). Fizychni vlastyvoli vugletzrvykh sypuchykh materialiv. [Physical properties of carbon bulks]. Kyiv : NTUU «KPI», 152 p. (Ukr.)
6. Pat. 139897 U Ukraine, IPC (2006.01) C 10 L 9/08. [Method of receiving the calcinated oil coke]. Ye.M. Panov, A.Ya.Karvatskii, I.O.Mikulionok, S.V.Leleka, O.V.Bondarenko, A.V.Vagin, O.V.Tiutiunnik; applicant and patent holder Private joint-stock company «Ukrgrafit». u201907630; application date 08.07.19; publication date 27.01.20, bulletin No. 2. (Ukr.)
7. Glukhov O.V., Karvatskii A.Ya., Mikulionok I.O., Leleka S.V. Modernizatsiia prystroiu dlia podavan-nia atmosferneho povitria v baraban obertovoi pechi. [Modernization of the device for supplying atmospheric air into the rotary kiln drum]. *X International scientific and practical conference «Effective processes and equipment for chemical industries and packaging equipment»*, Kyiv, UA, 12–13 Dec. 2019. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. pp. 5–6.
8. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. URL: <http://www.liggghts.com> (last access: 28.01.2020).
9. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. URL: — <http://www.paraview.org/> (last access: 28.01.2020).
10. Presentation Carbon Raw Materials for the Aluminum Industry by Les Edwards, Rain CII Carbon. *Metal Bulletin 30th International Aluminum Industry Conference*. URL: — <https://is.gd/5XdQ85> (last access: 28.01.2020).
11. Panov Y., Karvatskii A., Leleka S., Lazarev T., Pedchenko A. (2015). Shock wave-boundary layer interactions at the supersonic flow around threedimensional configurations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (4), pp. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2015.50911.
12. OpenFOAM — Open Field Operation and Manipulation. — URL: — <http://www.openfoam.org/> (last access: 28.01.2020).
13. Karvatskii A.Ya., Pulinets I.V., Pulinets I.V., Lazarev T.V. (2015). Chislennoye modelirovaniye sverkhzvukovykh techeniy s primeneniem otkrytogo programmynogo koda OpenFOAM. [Numerical modeling of supersonic flows using OpenFOAM open source software]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 21 (2), pp. 47–52. (Rus.)
14. Andreev I.A., Zubrii O.G., Mikulionok I.O. (1999). Zastosuvannia materialiv u khimichnomu mashinobuduvanni. Stali y chavuny. [Use of materials in chemical engineering. Steels also cast irons]. Kyiv : Institute of Teaching Content and Methods, 148 p. (Ukr.)

Received February 26, 2020