

Математичне Моделювання Процесу Графітування Вуглецевих Виробів

Олексій Жученко, Марія Волощук
кафедра «Автоматизації хімічних виробництв»
НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
azhuch@ukr.net, masha-voloshchuk@i.ua

Mathematical Modeling of Graphitization in Carbon Electrodes Production

Oleksii Zhuchenko, Mariia Voloshchuk
dept. of Automatization of chemical production
NTUU "Igor Slicorsky Kyiv Politechnic Institute"
Kyiv, Ukraine
azhuch@ukr.net, masha-voloshchuk@i.ua

Анотація—В роботі проведений аналіз існуючих математичних моделей процесу і економічний вплив, оптимізацію технологічного процесу, систему керування процесом графітації в печах Ачесона. Обране програмне забезпечення для вирішення поставленої задачі. Обрана найкраща структура спрощеної математичної моделі процесу графітації, яка може бути використана у подальших дослідженнях, що дозволить в найкоротші терміни і з мінімальними матеріальними витратами, виконати оцінку механічного і енергетичного стану печей графітації при різноманітних наперед завданих характеристиках технологічного регламенту, та забезпечить у синтезованій на її основі системі керування ресурсоенергозбереження і зменшення техногенного впливу на оточуюче середовище. Основні результати роботи можуть бути використані у подальших дослідженнях для оцінки механічного і енергетичного стану печей графітації, а також для подальшої розробки на їх основі системи керування процесом графітації необхідного для ресурсоенергозбереження і зменшення техногенного впливу на оточуюче середовище.

Abstract—We analyzed the existing mathematical models and economic side, optimization of technological modes, system of management of process furnaces graphitization in Acheson. Favorites software to solve the problem of the listing application. Selected mathematical model of the process graphitization that can be used in further research, which will in the shortest possible time and with minimal material costs, its estimates of mechanical and power status furnaces graphitization at various pre caused by the characteristics of technological requirements and provide the synthesized its resource conservation and energy based management system and reduction of anthropogenic impact on the environment. The main results can be used in

further research for further development on their basis of process control required to graphitization resource conservation and energy and reducing anthropogenic impact on the environment.

Ключові слова—графіт, графітація, вуглецеві вироби, графітувальна піч Ачесона, математична модель.

Keywords—graphite, graphitization, carbon products, abundant graphite furnace Acheson furnace, mathematical model.

I. ВСТУП

У сучасній промисловості виробництво вуглецевих виробів є важливим процесом, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різноманітних галузях промисловості, які нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Виробництво вуглецевих виробів є досить ресурсо- та енергозатратним. Окрім того, існує необхідність суворого дотримання підтримки певного рівня великої кількості технологічних змінних. Саме тому актуальною є задача введення оптимальних режимів роботи на ключових етапах виробництва з метою зменшення затрат та забезпечення високої якості продукції.

Одним з визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є процес графітування. Інтегральним показником якості графітованої продукції є ступінь графітації [1]. Тому задача системи керування є

забезпечення максимального ступеню графітації. При цьому на заключну стадію – процес графітування – припадає до 80 % загальних енерговитрат [2], що становить 8...10 МВт-годин на 1 тону продукції [3]. Тому задача підвищення ефективності процесу графітування у виробництві вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Ще одним чинником перевитрат енергоресурсів є неточне визначення тривалості кампанії графітування, яка для гарантованого забезпечення нормативної якості готової продукції триває довше, ніж потрібно.

II. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Знамеровський В. Ю. у своїй роботі [3] для розрахунку розподілу температурних полів в печі Ачесона запропонував використовувати методику чисельного рішення, засновану на методі елементарних теплових балансів з використанням явної і неявної схем апроксимації. В цих роботах під графітації розглядається як єдина цілісна система, що містить: джерело електроживлення, коротку мережу, вироби, що підлягають графітації, допоміжні шихтові матеріали і футеровку печі. В запропонованій чисельній моделі розрахунковим елементом є вертикальний напівв'яз, що складається із заготовок, зернової пересипки, теплоізоляції і кладки печі. З метою зменшити похибку розрахунків теплових і електричних параметрів процесу графітації, автором була запропонована оригінальна методика розрахунків, що базувалася на тому, що процес енергообміну між елементарними об'єктами розглядалася з врахуванням одночасної зміни їх температури від дії внутрішнього джерела теплоти. Тепло- і електрофізичні характеристики матеріалу обирались в залежності від середнього значення температури від дії внутрішнього джерела теплоти, що дозволило врахувати вплив останнього на кожному часовому кроці [2].

В чисельній моделі, запропонованій Знамеровським В. Ю., внутрішнє джерело теплоти в елементах печі враховувало лише джоулеві теплоту. З метою прискорення розрахунку застосовувалося спрощення геометрії керну, круглий переріз заготовок замінювався на прямокутні рівновеликі площі.

Аналізуючи існуючі промислові системи керування процесом графітування у печах Ачесона, можна зробити висновок про те, що усі вони здебільшого належать до категорії людино-машинних (автоматизованих) і найчастіше реалізують методи керування за електротехнічними параметрами [2], за температурою футеровки, за досягнутою температурою керна, за градієнтом температур у поперечному перерізі заготовок тощо. А також, можна сказати, що керування даним процесом ведеться за наперед заданою програмою зміни потужності (напруги) електричного струму засобів електроживлення. Така програма формується як усереднена функція на основі аналізу результатів багаторазового проведення процесу графітування. Такий підхід безумовно має недоліки, основним з яких є та обставина, що кожна окремо взята кампанія графітування у

загальному випадку відрізняється від узагальненого варіанту, наприклад, складом вуглецевих виробів, що обробляються, або складом та формою пересипки тощо. Крім того, у процесі графітування трапляються (особливо останнім часом) раптові відключення електроживлення, які ніяким чином не можуть бути передбачені наперед сформованою програмою.

Коржик М. В. [2] для оцінки теплоелектричного стану печі графітації запропонував спрощену модель електричного поля керна і адаптивну модель температурного поля печі графітації, яка враховує витрати енергії на випаровування вологи і функціонує в умовах неповної інформації про вологість і фізичні властивості матеріалів завантаження.

До загальних недоліків розглянутих вище чисельних моделей можна віднести наступні:

- не враховується залежність фізичних властивостей сипких матеріалів від тиску;
- немає врахування масо- і теплообміну при випаровуванні і конденсації вологи сипких матеріалів, а також в деяких, вище розглянутих, чисельних моделях не враховується навіть вологовміст;
- не враховується теплота хімічних реакцій, що відбуваються в керні, за винятком врахування теплоти, пов'язаної зі звільненням сірки від зв'язків з вуглецем всередині коксових частинок;
- в багатьох чисельних моделях застосовується спрощення геометрії керна, а врахування торцевих втрат виконується шляхом задання усереднених коефіцієнтів форми, що зменшують точність розрахунку;
- одновимірні і двовимірні моделі, не дозволяються оцінити радіальні перепади температур по горизонтальному перерізу заготовок, а усереднення властивостей рядів керну (заготовки і пересипка) збільшують неточність результатів розрахунку [2].

З вищесказаного слідує наступне, що в розглянутих чисельних моделях враховуються досить важливі особливості процесу графітації в печах опосередкованого нагріву, а їх застосування обмежено областю, в якій виконувалася перевірка їх адекватності.

До основних показників процесу графітування відносять дві групи показників: технологічні й режимні. Технологічні показники включають схему укладання керна, типи та розміри печей, перетин та довжину виробів, що графітуються, пересип очні та теплоізоляційні матеріали. До режимних параметрів відносяться температурні та енергетичні, які є тісно пов'язані між собою.

Основні характеристики температурного режиму процесу графітування включають: максимальну температуру у керні; час витримки керна при максимальній температурі; темп нагрівання заготовок; перепад температури у заготовках та ін. Енергетичний режим є визначальним фактором температурного режиму процесу графітування, який значно залежить від

властивостей керованої пересипки і геометрії керна та характеризується регламентом підводу потужності у піч, терміном кампанії графітування питомими витратами електроенергії.

Процес графітування виробів є надзвичайно енергоємним. Теоретичні витрати електроенергії на графітування електродних заготовок, тобто на їх нагрів до 2750°C, дорівнюють 1800 кВт·год/т, а фактичні – на печах Ачесона становлять 4000-5000 кВт·год/т (до 6500 кВт·год/т при графітуванні особливо якісних виробів)[17]. Таким чином понад 60% становлять теплові втрати у доквілля[18]. На печах Кастнера ПВЕ значно менші і становлять 3000 – 3500 кВт·год/т. Тривалість процесу графітування в печах Ачесона – від 36 до 120 годин, а в печах Кастнера – від 10 до 30 годин.

Таким чином, виходячи з ПВЕ печі Ачесона, витікає необхідність зменшення тепловитрат при графітування, наприклад, за рахунок зменшення тривалості процесу. Проте на шляху до прискорення процесу можуть стояти такі дві суттєві перешкоди: 1) збільшення ймовірності розтріскування вуглецевих заготовок при прискореному нагріванні; 2) недостатня потужність пічних трансформаторів.

III. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одним із важливих чинників, які впливають на показники графітування є операція завантаження. Робочий об'єм печі повинен бути заповнений керном таким чином, щоб його електричний опір був однаковим по усьому перетину. Це забезпечить рівномірність розподілу струму по всьому перетину і, відповідно, рівномірне нагрівання керна. Нерівномірна укладка керна призводить до значних перекосів у розподілі струму особливо при високих температурах.

Суттєвий вплив на показники графітування надають допоміжні матеріали – пересипка і теплоізоляційна шихта. Пересипка визначає теплоелектричний режим печі графітування. Дослідження температурного поля математичної моделі показали, що розподіл джоулевої теплоти по перетину керна визначається характером кривої температурної залежності ПВО пересипки та якістю теплоізоляції. Наприклад, для матеріалів зі значною залежністю ПВО від температури (антрацит, сирий кокс) перепад температури між центром і периферією керна збільшується.

Застосування керованої пересипки із графітованого коксу дозволило отримати доволі рівномірне температурне поле у період усієї кампанії графітування. Вплив зазору між заготовками та ПЕО пересипки і на якість кінцевих виробів досліджувався у. Було встановлено, що зменшення ПВО пересипки призводить до більш рівномірного розподілу джоулевої теплоти між заготовками і пересипкою та дозволяє більш рівномірно нагрівати заготовки [8].

Наразі у промисловості відсутні універсальні показники якості графітованих виробів. Тому вимоги до якості визначаються для кожного типу продукції окремо, виходячи з умов її експлуатації безпосередньо у

промислових агрегатах. В залежності від вимог проводиться оцінка за такими показниками:

фізичні властивості: істинна і позірна або об'ємна густина та поруватість, питомий електричний опір, теплопровідність, масова теплоємність, термічний коефіцієнт лінійного розширення;

механічні властивості: міцність, модуль пружності та зсуву, коефіцієнт тертя;

хімічні властивості: окислення, участь у реакціях утворення карбідів;

вміст домішок: вміст заліза, сірки та ін.

Названі вище обставини викликають необхідність з метою підвищення ефективності процесу графітування вуглецевих виробів впровадження сучасної системи оптимального керування ним на основі аналізу поточного стану технологічного процесу.

IV. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАФІТУВАННЯ

Як вже зазначалося, вуглеграфітове виробництво є дуже енергоємним. Тому для оптимізації його роботи доцільно використати рентабельність даного виробництва як показник ефективності:

$$R = \frac{Q}{C_{ек}} \quad (1)$$

де $C_{ек}$ – собівартість експлуатаційних витрат, Q – прибуток від реалізації продукції.

Використання даного критерію (1) дозволяє підвищити чутливість критерію оптимальності по відношенню до технологічних змінних, реалізація яких на об'єкті керування забезпечить функціонування останнього в оптимальному технологічному режимі [2].

При розв'язанні задачі оптимізації технологічних режимів виробництва потрібно враховувати обмеження на змінні, що оптимізуються. На виробництві вуглеграфітових виробів обмеження можуть бути сформульовані по різному.

Так, обмеження можуть бути виражені щодо кількості кожного виду продукції, що виробляється:

$$F_i \leq F_i^{max}, \quad (2)$$

де F_i^{max} – максимальна продуктивність виробництва на i -му виду продукції.

Обмеження, що інтегрує у собі всі види продукції, може бути сформульоване таким чином:

$$\sum_{i=1}^N g_i F_i \leq G_{max}, \quad (3)$$

де g_i – вага i -го виду продукції; G_{max} – максимальна потужність виробництва, виражена в одиницях ваги.

Таким чином, задача оптимізації технологічних режимів виробництва математично включає у себе критерій оптимальності (1) разом з обмеженнями (2) і (3). Дана задача являє собою задачу цілочисельного нелінійного програмування, яку можна розв'язати відомими методами, використовуючи стандартне програмне забезпечення [2] та може бути розв'язана у 2 етапи з використанням методів та програмних засобів лінійного програмування.

На процес графітування впливає цілий ряд факторів, зокрема, індивідуальні властивості вуглецевих матеріалів, газове середовище, передісторія термічної обробки, тривалість процесу, температура тощо. Вплив декотрих із них на процес графітування наразі до кінця не досліджений. Однак, як показують численні дослідження [2, 3], головним чинником, який визначає якість графітування вуглецевої речовини є кінцева температура. Причому для отримання якісного штучного графіту кінцева температура обробки повинна бути не нижче 2200 – 2800°C. Вимірювати такі температури в автоматичному режимі сучасними технічними засобами неможливо, а це означає, що нема перспективи побудувати класичну систему автоматичного керування на основі, скажімо, ПД-регуляторів.

Таким чином, метою даної статті є створення нової системи керування процесом графітування вуглецевих виробів, яка забезпечить заощадження енергоресурсів при збереженні потрібної якості готової продукції, для чого функціонування системи, на відміну від існуючих, повинно відбуватися не за наперед заданою програмою, а з урахуванням поточного стану об'єкта керування.

Задача системи керування процесом графітування вуглецевих виробів формулюється таким чином: забезпечити мінімізацію витрат енергоресурсів при збереженні потрібної якості готової продукції. Енерговитрати формуються двома складовими – потужністю електричного струму, що подається на процес, та часом кампанії графітування.

Як відомо [1 – 3], графітування вуглецевих виробів відбувається при температурах понад 2000°C. Тому процес графітування умовно можна розділити на дві стадії – розігрівання та безпосередньо графітування.

Для мінімізації енерговитрат у режимі розігрівання треба забезпечити максимально допустиму швидкість підвищення температури до досягнення в усіх вуглецевих заготовках температури графітування [1, 2]. При цьому швидкість підвищення температури обмежується механічною міцністю продукції, яка при значних градієнтах температур може бути пошкоджена у результаті

виникнення тріщин. Отже, задачею системи керування на стадії розігрівання є визначення та реалізація оптимальної функції зміни напруги електричного струму у часі.

Після досягнення потрібної температури графітування задачею системи керування є підтримання температури на заданому рівні за рахунок відповідної зміни напруги електричного струму до досягнення заданого значення ступеня графітування, який виступає як узагальнений показник готової вуглецевої продукції [2]. При цьому вирішальним моментом є тривалість процесу графітування, бо, враховуючи питомі витрати електроенергії (до 10 МВт-год. на 1 т продукції), визначення оптимального моменту зупинки подачі електроживлення є дуже важливим.

V. ВИСНОВКИ

Наприкінці, можна сказати, що в результаті літературного огляду за станом проблем математичного моделювання процесу графітування вуглецевих виробів в печах Ачесона виявлено, що в існуючих математичних моделях не враховуються такі важливі особливості процесу як залежність фізичних властивостей сипких матеріалів від тиску і їх вологовміст, масо- і теплообмін при випаровування і конденсації вологи, теплота хімічних реакцій, що відбуваються у керні тощо, а їх застосування обмежено областю. В якій виконувалася оцінка їх адекватності.

Таким чином, у відповідності до розглянутих стадій технологічного процесу графітування потрібно розробити системи керування двома стадіями - розігріву та графітування, задача керування процесом графітування вуглецевих виробів включає у себе критерій оптимальності та обмеження. І для розв'язання поставленої задачі керування у подальших дослідженнях потрібно розробити математичну модель процесу та метод врахування взаємозв'язаних параметричних обмежень, що і є завданням подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] D. M. Kuznetsov, V.P. Fokyn "The process of grafitization of carbon materials. Modern research methods": Novocherkassk: YuRHTU, 2001, 131 p., ISBN 5-88998-233-8, pp. 126-131
- [2] M. V. Korzhyk "Mathematical modeling and automated process control of grafitization in Acheson furnaces": Avtoref. dys. PhD: 05.13.07; The Ministry of Education and Science of Ukraine, NTUU «KPI». – Kyiv, 2010.
- [3] V. Yu. Znamerovskyy, V. V. Yashkyna " The study of energy input modes in a grafit furnace ": Promshlennaya enerhetyka, 1985, # 11, pp. 40–42.