

# ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КОТУНІВ НА КОНВЕЄРНІЙ ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНІ ЯК СИСТЕМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

## Постановка проблеми

До найбільш актуальних проблем фабрик огрудкування гірничо-збагачувальних комбінатів, зазвичай, відноситься теплоенергетичне устаткування конвеєрної випалювальної машини (КВМ), що працює у різних режимах, навантаженнях, різноманітних збуреннях, з сировиною та енергоносіями різних характеристик. Причиною зазначених змін часто є й робота інших контурів регулювання, що взаємозв'язані через об'єкт. Значна частина часу персоналом, що експлуатує системи регулювання, витрачається на виявлення й усунення технічних несправностей і настроювання параметрів регулювальних пристроїв. Як відомо, окремі елементи газоповітряних камер КВМ змінюють свої динамічні характеристики залежно від навантаження та інших факторів.

Продуктивності відділення огрудкування та опалення котунів повинні бути між собою узгоджені. Найкраще узгодження, при якому обидва відділення працюють в оптимальному режимі, тобто з повним завантаженням і максимальною продуктивністю, досягається при якомусь одному, зазвичай, коли не змінюються фізико-хімічні властивості котунів. У всіх інших випадках виникає одна з таких двох ситуацій. Продуктивність кожної зони КВМ обмежує темп роботи обладнання опалення. У цьому випадку оптимальним буде таке управління, при якому заданий розподіл температури по всім зонам у шару котунів досягається за мінімальний час. Це завдання про граничну швидкодію.

Експлуатаційний персонал, щоб уникнути частих перенастроювань регуляторів, прагне встановити по можливості, «слабкі» параметри налаштування, забезпечуючи стійкість системи регулювання при різних режимах роботи об'єкта. Природно, при цьому доводиться жертвувати характеристиками якості системи регулювання. А для працездатності системи необхідно, щоб процес автоматичного регулювання досягав певних якісних показників. Вимоги до якості процесу регулювання в кожному випадку можуть бути найрізноманітнішими, однак з усіх якісних показників можна виділити декілька найбільш істотних, наприклад, час регулювання й динамічна похибка. Тому розробка систем, що можуть самостійно або під наглядом оператора підлаштовуватися під зміни об'єкта керування, є актуальною науковою та практичною задачею.

## Аналіз останніх досліджень та публікацій

Масштабні дослідження щодо збереження витрат енергоносіїв, що витрачаються на випалювання котунів, проводяться як за кордоном, так і в нашій країні [1–4]. Питанню вивчення теплового режиму випалювання котунів було присвячено ряд робіт при математичному описі теплофізичної моделі процесу в основу приймалися рівняння теплового балансу (збереження енергії) і різних видів теплопередачі [5–9].

У зазначених роботах, а також в [10,11] досліджувані ділянки шару котунів представляються у вигляді масиву  $axbxc$  блоків кубічної форми, для кожного з яких склалися системи рівнянь. З огляду на те, що вітчизняний розвиток процесу огрудкування рухається в напрямку збільшення висоти випалювального шару котунів, застосування зазначеного методу тягне за собою складання десятків систем рівнянь, що ускладнює його практичне застосування. Також недоліком представлених математичних моделей можна вважати відсутність у описі процесу виду палива і розташування котунів по висоті і ширині палети, що зустрічається і в більш пізніх роботах [10, 11, 13, 14], останнє є основним фактором, що впливає на тепловий режим процесу випалювання котунів.

У роботах [5, 6] запропоновані методи моделювання на основі формально-математичного опису фізико-хімічних явищ і реалізації обчислювального експерименту. У роботах [6, 9] викладені основні етапи розробки комплексної математичної моделі, що відповідає вимогам максимальної адекватності реальним теплофізичним і фізико-хімічним процесам, що протікають у шарі при спіканні залізородних матеріалів. Однак, зазначені математичні моделі розглядають випалювальний агрегат у цілому і не розглядають детально тепловий режим процесу випалювання.

Збереження високої якості керування контурами та елементами устаткування, що сприяє економії ресурсів та енергоносіїв, підвищенню продуктивності, якості котунів, строку служби обладнання, позитивно відобразиться на загальній роботі підконтрольних технологічних процесів та інженерних систем найшло відображення в [2–4, 9].

Синтез придатних до використання систем керування КВМ ускладнюється суттєвим запізненням, характерним для контурів керування теплоенергетичними процесами. Від цих режимів і характеристик залежить якість виготовлених котунів і продуктивність КВМ [1–4]. Сьогодні на КВМ, як правило, застосовуються регулювальні прилади й інші елементи систем автоматичного управління, параметри яких встановлюються при налагодженні й після цього залишаються незмінними для кожної газоповітряної камери КВМ [3, 7]. Такі регулятори відносно до об'єктів зі змінними динамічними характеристиками в основному не можуть забезпечити якісного регулювання, а іноді навіть стійкого процесу, хоча в деяких випадках вдається задовільно вирішити це завдання установкою, так званих, компромісних налаштувань [5–7].

На практиці часто об'єкти регулювання КВМ, які характеризуються великою складністю математичного опису їх руху, що обумовлено високим порядком їх диференціального рівняння, наявністю гостро коливальних і навіть нестійких ланок. Домогтися високої якості процесів у такій системі раніше розглянутими порівняно простими рішеннями з одним зовнішнім зв'язком і одним регулятором, як правило, не вдається. Але для регулювання об'єктами КВМ може виявитися ефективними способи управління, які надані у літературі [8–14].

Для аналізу обсягів виділення і поглинання теплоти в елементарному обсязі шару котунів доцільно скористатися описом процесу на базі балансового методу з урахуванням теплових процесів у шарі котунів.

### Формулювання мети роботи

Продуктивність обмежена потужністю обробного устаткування, і, отже, темп роботи кожної зони фіксований. У цьому випадку виникає завдання – за заданий час забезпечити найкращу якість виготовлених котунів. Критерієм оптимальності тут є якість випалення котунів, виражена тим чи іншим чином. Нижче наводиться одна з можливих постановок задачі такого роду. Тому метою роботи є варіант представлення термічної обробки котунів на конвеєрній опалювальній машині, як систему з розподіленими параметрами.

### Викладення матеріалу та результати

У зоні КВМ відбувається нагрівання котунів двома гріючими середовищами (два пальники) з двох сторін з температурами  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$ . Нехай розподіл температури  $\theta(x, t)$  шару котунів по довжині машини  $x$  ( $-L \leq x \leq +L$ ) і за часом  $t$  ( $0 \leq x \leq T$ ) підпорядковується диференціальному рівнянню в часткових похідних другого порядку – рівняння теплопровідності Фур'є (1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт теплопровідності.

Є деяке початкове (при  $t = 0$ ) розподіл температури по товщині (2):

$$\theta(x, 0) = \theta_0(x). \quad (2)$$

Крайові умови (зв'язок з гріючими середовищами на кінцях заготовки) визначаються виразами (3):

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} &= a_1 [u_1(t) - \theta(L, t)] \\ -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=-L} &= a_2 [u_2(t) - \theta(-L, t)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $a_1, a_2$  – коефіцієнти теплообміну між середовищем, що гріє і котунами.

На керуючі функції, що характеризують температури середовища, що гріє,  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$ , накладаються обмеження (4):

$$\left. \begin{aligned} A_1 &\leq u_1(t) \leq A_2 \\ A_3 &\leq u_2(t) \leq A_4 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При неприпустимості різких перепадів температури всередині котуна, що нагрівається, обмежується градієнт внутрішнього температурного поля (5):

$$\left| \frac{\partial \theta}{\partial x} \right| \leq A_5. \quad (5)$$

Завдання оптимального випалення котунів при фіксованому часі нагріву формуються так: знайти такий закон зміни температури середовища, що гріє, в часі, щоб за час  $T$  забезпечити мінімальне відхилення розподілу температури шару котунів від заданого розподілу.

Відхилення від заданого розподілу можна охарактеризувати, наприклад, таким функціоналом (6):

$$J = \int_{-L}^L |\theta(x) - \theta(x, T)|^p dx, \quad (6)$$

де  $\theta(x)$  – заданий розподіл, що визначається технологічними вимогами;  $\gamma$  – додатне число.

При  $\gamma = 2$  отримуємо середнє квадратичне відхилення. При оптимізації нагріву мінімізується функціонал  $J$ .

### Висновки

Особливість розглянутої задачі полягає в тому, що керований об'єкт є системою з розподіленими параметрами і описується диференціальним рівнянням у часткових похідних. Таку систему розглядають як граничний випадок системи із зосередженими постійними при нескінченному збільшенні числа її фазових координат.

### Список літератури

1. Пирматов Д. С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине / Пирматов Д. С. // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. – Воронеж, 2010. – С. 88–89.
2. Юсфин Ю. С. Интенсификация производства и улучшение качества сырых окатышей / Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф., Антоненко Л. К. – М. : Металлургия, 1994. – 240 с.
3. Буткарев А. А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах / А. А. Буткарев // Сталь. – 2011 – № 5. – С. 4–8.
4. Буткарев Г. М. Математические модели для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине / Буткарев Г. М. Майзель, Е. В. Некрасова Е. В. // Сталь. – 2000. – № 3. – С. 10–13.
5. Боковикова А. Х. Компьютерный расчет тепло массообменных процессов при окислительном обжиге окатышей на конвейерной машине / А. Х. Боковикова, В. М. Малкин, С. Г. Меломуд // Сталь. – 1995. – № 4. – С. 8–10.
6. Бережной Н. Н. Математическое моделирование температурного поля окатыша / Н. Н. Бережной, В. М. Серебренников, А. В. Зайцев // Вісник Криворізького технічного університету : Зб. наук. праць. – Кривий Ріг: КТУ, 2008. – Вип. 20. – С. 188–193.
7. Рубан С. А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / Рубан С. А., Лобов В. Й. // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – С. 69–74.
8. Цаплин А. И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии: учеб. пособие / А. И. Цаплин, И. Л. Никулин. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. унив., 2011. – 299 с.
9. Боковиков Б. А. Математическое моделирование динамики процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Б. А. Боковиков, В. М. Малкин, М. И. Найдич // Металлургическая теплотехника. – 2002. – № 8. – С. 25–31.
10. Лобов В. Й. Моделювання розподілу температур у шарі залізородних обкотишів газоповітряної камери в конвеєрних печах фабрики огрудкування / Лобов В. Й., Котляр М. О. // Научный вестник Национального горного университета. – 2015. – № 2. – С. 109–117.
11. Лобов В. Й. Дослідження термічної обробки шару обкотишів в газоповітряній камері обпалювальної машині конвеєрного типу / Лобов В. Й., Котляр М. О. // Научный вестник Национального горного университета. – 2015. – № 3. – С. 131–136.
12. Рубан С. А. Комп'ютерне моделювання алгоритму оптимального керування температурним режимом випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С. А. Рубан, В. Й. Лобов // Вісник КТУ: зб. наук. праць. – Кривий Ріг : КТУ, 2008. – Вип. 21. – С. 150–154.
13. Lobov V. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / V. Lobov, K. Lobova, M. Koltiar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 34–38.
14. Lobova K. Pellets Temperature distribution on a conveyor roasting machine / K. Lobova // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 8. – P. 12–15.

Одержано 11.12.2015

© Канд. техн. наук В. Й. Лобов, К. В. Лобова

Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг

**Lobov I., Lobova K. Presentation of the thermal treatment of pellets on the conveyor of the burning car as a system with distributed parameters**