УДК 669.162.1
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163278

Визначення впливу параметрів газоповітряних потоків на термічний процес виготовлення залізорудних обкотишів

В. Й. Лобов, К. В. Лобова, О. В. Митрофанов

Наведено результати дослідження зміни температури газоповітряних потоків на виході із зони випалювання і рекуперації конвеєрної випалювальної машини. Визначено вплив цих температур на інші технологічні зони.

Показано, що середньооб'ємні значення температур газоповітряних потоків із зон випалювання і рекуперації є експоненціальними залежностями від температур газоповітряних потоків над шаром обкотишів у цих зонах. Встановлено, що збільшення швидкості переміщення випалювальних візків від 0,011 м/с до 0,06 м/с приводить до зменшення у 1,7 рази середньооб'ємного значення температури нагрітого газоповітряного потоку. Збільшення висоти шару обкотишів на випалювальних візках на 30 відсотків при постійній газопроникності цього шару приводить до зменшення по експоненціальному закону середньооб'ємну температуру газоповітряного потоку в 2,5 рази на виході із зон випалювання і рекуперації. При зміні тиску в зоні випалювання на 20 %, постійній швидкості переміщення випалювальних візків 0,049 м/с, висоті шару обкотишів 450 мм і пористості шару обкотишів рівною 0,45 м³/м³ середньооб'ємні температури газоповітряних потоків на виході з шару обкотишів зменшуються до трьохкратної величини.

Для аналізу температурного режиму газоповітряного потоку на виході зони випалювання обкотишів використано математичну модель. В основі математичної моделі враховано, що входи і виходи технологічних зон машини пов'язані рівняннями газодинаміки, теплообміну і масообміну.

Дослідження дозволило розробити і представити автоматизовану систему управління димотягами за середньооб'ємними температурами газоповітряних потоків на виході із технологічних зон випалювання і рекуперації, яка може бути використана в промислових умовах.

У результаті забезпечується покращення термічного процесу та газодинамічної роботи технологічних зон конвеєрної випалювальної машини

Ключові слова: конвеєрна машина, технологічні зони, шар обкотишів, температура, тиск, керування газоповітряними потоками

1. Вступ

Конвеєрні машини (КМ) являють собою складні енергетичні системи, які забезпечують термічний процес вироблення залізорудних обкотишів. Такі технологічні машини є одними з найбільш енерговитратними.

Сьогодення виникає необхідність у забезпеченні максимальної продуктивності виготовлення залізорудних обкотишів на КМ при високій їх якості та

Не является предзаданием

зниженні енерговитрат. Це істотно впливає на собівартість готової продукції фабрики огрудування гірничо-збагачувального комбінату.

Найважливішим напрямком енергозбереження є економічне спалювання палива і раціональне використання газоповітряних потоків при виготовлені залізорудних обкотишів. Суттєво впливають на виготовлення обкотишів процеси температурного і газодинамічного режимів, що діють у кожній зоні КМ. Додатково змінюються їх енерговитрати при транспортуванні, сушінні, попередньому нагріванні, випалювання і охолодженні.

При виготовлені залізорудних обкотишів необхідно чітко дотримуватися інтервалу температур і часу їх обробки у кожній зоні, щоб отримати обкотиші найкращої якості. Крім параметрів термічного процесу на обробку обкотишів, які обумовлюють параметри зон КМ, існують й інші, які впливають на структуру і міцність випалених обкотишів. До таких параметрів відноситься підтримка рівномірних процесів сушіння, попереднього нагрівання, випалювання і охолодження всього шару обкотишів. Це досягається при витримуванні потрібного температурного газоповітряного потоку по зонам КМ. Тому, актуальними стають питання дослідження закономірностей і процесів, що протікають у кожній технологічній зоні, та особливо поліпшення газодинамічних характеристик КМ.

Дотримання газодинамічних і температурних характеристик на КМ при виготовлені обкотишів не в повній мірі контролюється в її технологічних зонах, що пов’язано з практичною неможливістю прямого вимірювання температури в шарі обкотишів на випалювальних візках. Тому управляти термічним процесом виготовлення обкотишів приходиться на основі не прямого визначення температури обкотишів [1]. У цьому напрямку фахівцями проводиться дослідження, у результаті яких з’явились нові розробки. Підтвердженням цього є праці, присвячені дослідженням, які суттєво впливають на ефективність роботи зон сушки, випалювання, охолодження КМ [2−4]. Це вказує на те, що необхідно провести додаткові дослідження для уточнення перерозподілу параметрів газоповітряного потоку по зонам КМ. Потрібно врахувати його значення при змінах: швидкості переміщення випалювальних візків, висоти шару обкотишів на них, тощо. При врахуванні таких змін забезпечиться ефективний газодинамічний режим у зонах КМ і, як наслідок, випуск якісної продукції. Тобто, такий підхід свідчить також про те, що тематика досліджень, присвячених процесу термічного процесу виготовлення обкотишів на КМ з управлінням параметрами газоповітряних потоків, є актуальною науковою та практичною задачею.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблем

У роботі [5] наведены результати досліджень дворівневої система оптимізації режиму термообробки обкотишів. Показано, що на верхньому рівні на основі математичних моделей технологічних зон періодично вирішується завдання статичної оптимізації режиму. Одночасно на нижньому рівні з використанням спостерігача стану оцінюються параметри шару обкотишів і стабілізується оптимальний режим термообробки. Але залишилися не вирішені

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

питання, які пов'язані з не урахуванням у математичних виразах моделі параметрів для визначення впливу газоповітряних потоків на технологічні зони КМ. Причиною цього є труднощі, пов'язані з виміром параметрів газоповітряних потоків у технологічних зонах КМ. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути дослідження, результати яких представлені у роботі [6]. Саме для визначення розподілу температур в окремих зонах КМ по висоті шару, запропонована теплова модель процесу випалювання обкотишів. Встановлено основні залежності та теплофізичні властивості матеріалу, що є вихідними даними для моделювання процесу. Проте в моделі не вирішується питання підтримки заданих параметрів газоповітряних потоків упродовж технологічних зон КМ. В іншій роботі [7] виконано порівняльний аналіз сучасних теплотехнічних схем випалювальних конвеєрних машин для термообробки залізорудних обкотишів. Показано, що кожна з проаналізованих схем має резерви поліпшення показників роботи. Але не розглядається питання керування існуючими тягодуттьовими пристроями, що дозволяє економити газо-теплоенергоносії. Зменшити в середньому на 2 $м^3$/год споживання природного газу можливо при використанні системи керування термічним процесом виготовлення обкотишів із нечітким контролером [8]. Одночасне впровадження в цій системі атомно-емісійної спектроскопії обкотишів збільшує продуктивність КМ на 2,5 %. Ці показники досягаються за рахунок більш рівномірної газопроникності шару котунів, що призводить до збільшення швидкості фільтрації газового потоку та інтенсифікації процесу теплообміну в шарі котунів. Але залишились не вирішеними питання впливу газоповітряних потоків із однієї технологічної зони на інші. Математична модель, що використовується у системі з нечітким контролером, не враховує зміни параметрів газоповітряних потоків, які впливають на якість обкотишів. У роботі [9] надано результати досліджень при використанні в моделі розподілу температури в шарі котунів у технологічній зоні випалювання. Тут моделюються процеси теплообміну і теплового випромінювання по висоті шару обкотишів. Проте в моделі не враховується зміна параметрів газоповітряного потоку, що приводить до значних похибок визначення параметрів термічного режиму обкотишів у зоні випалювання КМ. Це все приводить до зменшення продуктивності КМ. Основним параметром, що практично визначає продуктивність КМ, згідно [10], є коефіцієнт опору шару обкотишів. Тому, для визначення газодинамічного стану шару доцільно використовувати напівемпіричне рівняння Дарсі-Вейсбаха, яке широко використовується в шаровій газодинаміці. Саме такий підхід можливо використати для визначення параметрів газоповітряних потоків на виходах технологічних зон. Але цей підхід не можливо використати при визначені перерозподілу цих потоків упродовж зон КМ.

У інших роботах відмічається, що така технологія обробки залізорудних обкотишів на КМ, що містять шихтові матеріали, має ряд труднощів і особливостей [2, 4]. До них відносяться значні енерговитрати при не раціональному використанні газоповітряних потоків. Окрім цього, при переміщенні випалювальних візків упродовж технологічних зон КМ відсутня можливість контролю температури шару обкотишів у реальному часі [6, 9, 10]. Все це

Не является передаточным

приводить до не якісного термічного процесу при виготовлені обкотишів. Проте інтенсифікація теплообміну в шарі обкотишів не вирішується за рахунок управління швидкістю руху високотемпературних газоповітряних потоків, параметри яких залежать від висоти шару і потужності димотягів. Результати інших досліджень [4, 11], показали, що при усіх величинах розрядження у вакуум-камерах технологічних зон не існує оптимальної по продуктивності висоти шару обкотишів на випалювальних візках КМ. Так при розрідженні близько 4,5 кПа у вакуум-камерах технологічних зон із високою температурою, оптимальна висота сирих обкотишів повинна складати 0,45−0,48 м, а разом з «постіллю» 0,5–0,55 м, яка не утримується у заданих діапазонах. Однак слід зазначити, що в даних роботах практично не розглядаються можливості використання автоматизованих систем для управління перерозподілом газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ. Це означає, що не в повній мірі визначено, як саме протікає процес зміни параметрів газоповітряного потоку по зонам КМ.

У наукових роботах [2, 6, 11]. надано рекомендації щодо використання оптимальних режимів термічного процесу, що дозволяють отримувати залізорудні обкотиші з високими металургійними властивостями. Для цього пропонуються математичні моделі для управління процесом виробництва обкотишів на КМ. При цьому, в математичних моделях не враховується вплив параметрів газоповітряних потоків на термічний процес і не вирішено питання перерозподілу цих потоків по технологічним зонам КМ.

Окрім виконання аналізу протікання термічних процесів на математичних моделях, дослідники на цих моделях шукають шляхи підвищення якості виготовлення залізорудних обкотишів і збільшення продуктивності КМ [12−16]. Так, у роботі [12] система автоматичного керування термічною обробкою обкотишів на КМ здійснює адаптацію відомих моделей та алгоритмів керування до змін параметрів об’єкта та зовнішніх впливів. У моделях враховуються: швидкість руху стрічки, висота шару, витрати газу, швидкість продуву, вологість, середній діаметр обкотишів, основність та склад заліза в обкотишах. Це дає збільшення продуктивності КМ на 2,5 %. Проте виникають проблеми з виміром у реальному часі в потоці таких технологічних параметрів, наприклад, яка температура всередині шару обкотишів на випалювальних візках. При цьому не враховується розподіл теплоти газоповітряних потоків по зонам КМ. Результат протікання такого технологічного процесу приводить до отримання не якісних обкотишів і надмірного використання природного газу.

Нові технології в наукових дослідженнях, що присвячені методологіям системного аналізу та процедурам використання математичного моделювання теплофізичних процесів у металургії, запропоновані у [14, 15]. У цих роботах надаються можливі шляхи підвищення техніко-економічних показників КМ. Пропонується подальша модернізація діючих автоматизованих систем управління процесом випалювання обкотишів у напрямку оптимізації технологічного режиму. При використанні сучасної теорії автоматичного управління автори не повно розглядають процес виготовлення обкотишів. Запропоновані ними

Только для чтения

моделі не враховують вплив температур газоповітряних потоків сусідніх зон на процес виготовлення обкотишів.

До недоліків моделей, що надані у [13, 16], можна віднести нехтування теплообміном між сирими обкотишами та вже запеченими, що розташовані по периметру випалювальних візків, та між обкотишами та цими візками. Моделі не враховують вплив температури газоповітряного потоку, що відходить із зон випалювання і рекуперації на зони сушіння та попереднього нагрівання на термічний процес виготовлення обкотишів.

Проведені дослідження в роботі [17] дозволили встановити необхідність диференційованого укладання обкотишів по висоті шару для виключення нерівномірності їх теплової обробки. Запропоновано конструкцію валкового гуркоту, який забезпечує необхідну сегрегацію гранул по горизонтах. Проте, при цьому не розглядається питання, як впливає газоповітряний потік на термічний процес при такому укладанні обкотишів.

У роботі [18] представлено математичну модель процесу випалювання рудовугільних обкотишів на КМ. У моделі структура рудовугільних обкотишів є сферою, яка складається з рівномірно розподілених гранул руди, вапняку і палива. Радіуси сфер задаються виходячи з можливостей млинового обладнання, що суттєво обмежує використання цієї моделі. Результати динамічного моделювання процесів індукції гранул у прямоточній системі надано у роботі [19]. Відомі моделі не враховують розподіл теплоти і вплив швидкості газоповітряного потоку на процес виготовлення обкотишів. У моделі не ведеться розрахунок зміни внутрішньої енергії кожного з взаємодіючих обкотишів. При дослідженні не розрахована кількість повітря, необхідного для повного згоряння природного газу, що забезпечить більш раціональне його використання. Модель не дозволяє визначати зміну температури газоповітряного потоку при проходженні шару обкотишів. Основною перевагою інших математичних моделей є оптимізація процесу випалювання обкотишів по окремим зонам КМ [20, 21]. Але запропонована оптимізація термообробки обкотишів не дозволяє раціонально використовувати газоповітряні потоки впродовж технологічних зон КМ. Враховуючи дію цих потоків практично приводить до зниження питомі енерговитрат. Окрім цього, необхідно виконати додаткові перетворення для переходу від кількості тепла до конкретних значень температури у технологічних зонах випалювання і рекуперації. За допомогою математичних моделей науковці досліджують падіння тиску потоку в щільному шарі по висоті та зміні радіусу обкотишів. [20–23]. У приведених моделях дослідники не враховують вплив і перерозподіл параметрів газоповітряних потоків по технологічним зонам і вздовж усієї КМ. Не визначення цих параметрів позначається на не якісному термічному процесі виготовлення обкотишів. Представлені результати досліджень у цих наукових працях не дозволяють розробити технічні рішення, що покликані забезпечити поліпшення газодинамічних характеристик у шарі обкотишів і технологічних зонах КМ. Інші дослідники аналізують вплив коефіцієнта газодинамічного опору шару обкотишів на термічний процес виготовлення обкотишів [24]. Як відомо, пористість шару обкотишів різна від зони до зони, тому суттєво змінюються

Не является передзаданием

газоповітряні потоки, які проходять через шар обкотишів у кожній технологічній зоні. Це приводить до зміни термічного процесу виготовлення обкотишів на КМ. Закономірності зміни параметрів газоповітряних потоків з урахуванням коефіцієнта газодинамічного опору шару обкотишів у цій науковій роботі відсутні.

Певного інтересу заслуговують роботи авторів, що досліджують на математичних моделях газодинаміку потоків і моделюють охолодження шару обкотишів, або досліджують падіння тиску в щільному шарі [25–27]. Деякі моделі ускладнюють процесами адсорбції і десорбції [28]. У найбільш сучасних дослідженнях використовують прогнозуючі ANFIS-моделі [29] для керування температурним режимом процесу випалювання обкотишів. Проте, відомі моделі не дають повного уявлення про розподіл газоповітряного потоку по зонам КМ.

Не виявлено результатів досліджень, що поліпшують енергоефективність газодинамічних характеристик при термічному процесі виготовлення обкотишів. Тому є підстави вважати, що існує недостатня визначеність впливу параметрів газоповітряних потоків, що подаються із технологічних зон випалювання і рекуперації у інші зони. При цьому, також не визначено вплив атмосферного повітря, на термічний процес виготовлення обкотишів. Можливо припустити, що завдяки управлінню параметрами газоповітряних потоків, підвищується не тільки якість протікання термічного процесу обробки залізорудних обкотишів, а знизяться витрати природного палива і кількість шкідливих викидів у атмосферу. Забезпечення найкращих газодинамічних характеристик на КМ обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження зміни параметрів газоповітряних потоків на виході технологічних зон випалювання і рекуперації КМ із визначенням можливості керування термічним процесом виготовлення залізорудних обкотишів у функції зміни температури газоповітряних потоків, що відходять із цих зон.

Для реалізації мети поставлено наступні задачі:

– визначити параметри газоповітряних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації та впливають на термічний процес виготовлення обкотишів на КМ і на основі цих визначень розробити структурну схему управління димотягами для керування термічним процесом виготовлення залізорудних обкотишів на КМ;

– знайти розподіл температур газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ при керуванні димотягів у функціях середньооб'ємних температур газоповітряних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації.

4. Визначення параметрів газоповітряних потоків, що впливають на термічний процес виготовлення обкотишів КМ

Щоб знайти параметри газоповітряних потоків, які відходять із тех.-нологічних зон випалювання і рекуперації, потрібно враховувати те, що КМ

Только для ознакомления

працює у різних режимах, навантаженнях, різноманітних збуреннях, з сировиною та енергоносіями, що мають різні характеристики. Зміна цих характеристик приводить до коливань аеродинамічного опору шару обкотишів, що в свою чергу впливає на кількість присосів під випалювальними візками, і відповідно й на параметри газоповітряного потоку під ними, порушуючи газопроникність шару. По цим причинам утримання регламентного режиму термічного процесу виготовлення обкотишів на КМ необхідно вести з урахуванням параметрів газоповітряних потоків і визначенням кількості подачі атмосферного повітря.

Для більш якісного протікання термічного процесу виготовлення залізорудних обкотишів на КМ вдосконалюють автоматизовані системи керування термічним процесом в окремих технологічних зонах, широко використовуючи при цьому різні алгоритми роботи і математичні моделі. Для вихідних даних використовують результати експериментів, статистичних випробувань, експертне оцінювання, результати складних обчислень. У залежності від типу КМ до таких вихідних даних віднесемо наступні. Так, висота шару обкотишів на випалювальних візках утримується на рівні від 0,32 до 0,5 м, а діаметри обкотишів змінюються від 5 до 16 мм із вмістом вологи в межах від 8,8 до 10,8 %. Коливання навантаження шару сирих обкотишів на випалювальних візках досягає 20 % при продуктивності 250 т/год, що складає приблизно 55–85 кг/с. Це викликає нерівномірну висоту шару обкотишів [3, 15]. Залежно від цього коливання навантаження відповідно змінюється швидкість переміщення випалювальних візків у продовж технологічних зон КМ від 0,5 до 5,6 м/хв.

Термічний процес виготовлення обкотишів на КМ практично залежить від швидкості фільтрації (руху) газоповітряного потоку через шар [15, 17], значення якої тісно взаємодіє з газопроникністю через шар обкотишів. Швидкість фільтрації повітря залежить від параметрів обкотишів у шарі та величини розрідження під випалювальними візками. Тому, з переходом на нову технологію, наприклад спікання обкотишів при збільшенні висоти шару для підвищення продуктивності КМ, проводять до реконструкції димотяги, збільшуючи потужності їх електродвигунів. При цьому відомо, що підвищення вакууму пов’язано зі збільшенням витрат електроенергії і прососу повітря, а ущільнення КМ вимагає значних додаткових капітальних витрат.

Тому, в даний час краще приділяти час дослідженням, спрямованим на раціональне використання і управління параметрами газоповітряних потоків і своєчасну подачу атмосферного повітря у технологічні зони КМ. Таке керування забезпечується управлінням димотягами. При цьому автоматизована система управління димотягами повинна враховувати параметри газоповітряних потоків, технічні та технологічні параметри КМ і обкотишів. Існують різні структури теплотехнічних схем КМ, як вказано в [2, 7]. Проте покращити їх роботу можливо при керуванні параметрами газоповітряних потоків у функції зміни температури газоповітряного потоку, що відходить із зон випалювання і рекуперації. Для цього достатньо використати автоматизоване управління димотягами, які можуть працювати за різними алгоритмами і

Не является собственностью

моделями. Окрім цього, завдяки раціональному управлінню подачею димотягом атмосферного повітря, що надходить у зону випалювання через зону охолодження, можуть забезпечуватися оптимальні газодинамічні характеристики в цій та інших зонах КМ. Це змінює якість термічного процесу виготовлення обкотишів, знижує витрати енергоносіїв і знижує кількість шкідливих викидів у атмосферу.

5. Розробка структурної схеми автоматизованої системи управління димотягами КМ

Для ефективного автоматичного керування розподілом газоповітряних потоків на КМ у функції змін параметрів газоповітряного потоку, що відходить із зон випалювання і рекуперації, розроблено автоматизовану систему управління (АСУ) димотягами. Структурна теплотехнічна схема КМ і АСУ надані на рис. 1. Схема складається з наступних структурних елементів: Д1, ..., Д5 – димотяги, ГО – газоочистка, БУ1, …, БУ3 – блоки управління, ДТ1 і ДТ2 – датчики температури, $Д_{ВШО}$ – датчик висоти шару обкотишів, $Д_{ШВВ}$ – датчик швидкості переміщення випалювальних візків.

Обкотиші на випалювальних візках рухаються послідовно через зони: сушіння 1 і 2, попереднього нагрівання 3, випалювання 4, рекуперації 5 і охолодження 6 і 7. Атмосферне повітря подається в зону охолодження 7. Це повітря нагрівається, оскільки воно проходить через шар нагрітих обкотишів, охолоджуючи їх та подається у зону охолодження 6. Підігрітий до 900 °С газоповітряний потік по колектору, що є перітичним, направляється у зони: рекуперації 5, випалювання 4, попереднього нагрівання 3 і сушіння 2. Одночасно у зоні випалювання газоповітряний потік нагрівається до 1300 °С за допомогою спалювання природного газу. Для спалювання цього газу використовуються пальники. Нагрітий до цієї температури газоповітряний потік проходить через шар обкотишів, доводячи їх до випалювання. Газоповітряний потік зони охолодження 7, який подається у зону попереднього нагрівання 3 видаляє залишки вологи із обкотишів. Димотяг Д6 подає газоповітряний потік у зону сушіння 2 після його проходження через шар обкотишів зони випалювання 4. У зоні сушіння 1 газоповітряний потік поступає в шар обкотишів продувом знизу в секцію 1 і прососом зверху в секцію 2.

Только для чтения

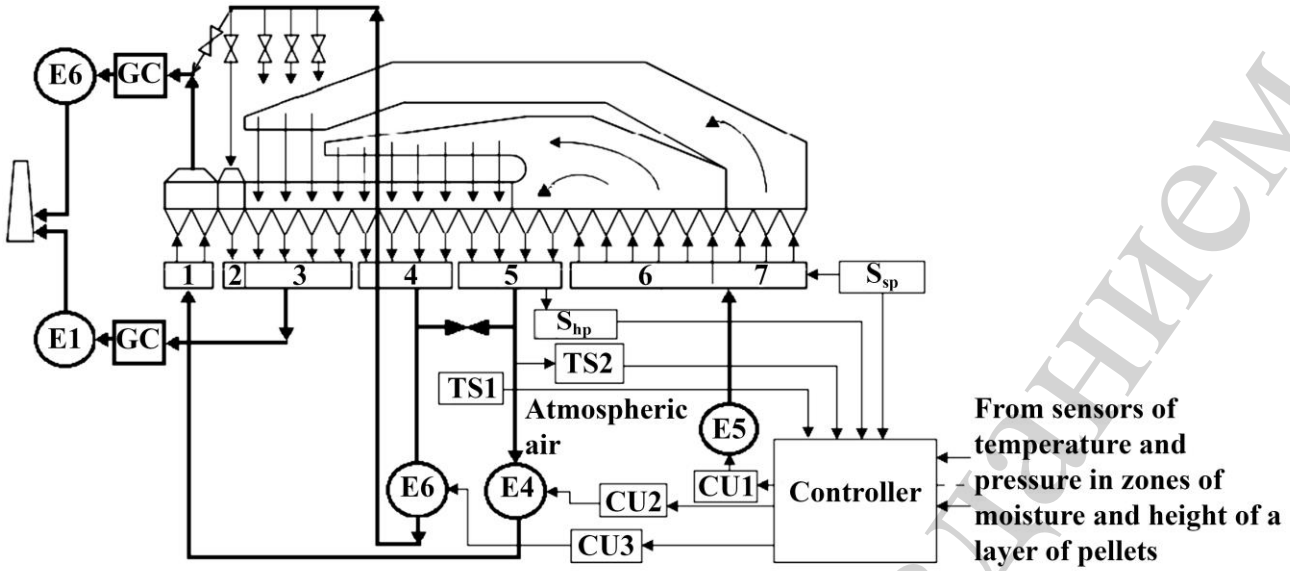


Рис. 1. АСУ димотягами за температурою газоповітряних потів, що надходить із технологічних зон випалювання, рекуперації і охолодження КМ

Реалізація технічного рішення, спрямованого на передачу максимальної кількості теплоносія з горна охолодження в сурми зон нагріву, виконується прямим перетіканням. Високотемпературний газоповітряний потік із зони охолодження 7 КМ за допомогою Д5 подається в зону випалювання 4, низькотемпературний потік – у зони сушіння 1 і попереднього нагрівання 3. Передача газоповітряного теплоносія з однієї зони низького тиску в іншу прямим перетіканням дозволяє максимізувати кількість витрат палива і електроенергії. Це реалізовано за теплотехнічною схемою з використанням двох поточного перетичного колектору, реалізований на димотягах, позначених як: Д6 і Д4. При цьому вибір розрідження в колекторах Д6 і Д4 здійснюється таким чином, щоб забезпечити мінімально необхідну різницю тисків від 50 даПа до 70 даПа. Це потрібно для організації підсосу в тракт Д4. Також, враховуються можливості роботи димотягів за температурою теплоносія по трактах Д6 і Д4 із тим, щоб виключити розведення потоку атмосферним повітрям з метою зниження температури.

АСУ працює за наступним алгоритмом.

На вхід контролера задаються потрібні діапазони температур і тисків газоповітряних потоків для технологічних зон КМ. Контролер керує через блоки управління БУ2 і БУ3 димотягами Д4 і Д6, забезпечуючи оптимальну подачу газоповітряного потоку відповідно в зони сушіння 1 і попереднього нагрівання 2. Контролюючи середньооб'ємні значення температур газоповітряних потоків, що надходить із зон випалювання 4 і рекуперації 5 КМ, регулюють тиск подачі газоповітряних потоків у зони сушіння 1, 2 і попереднього нагрівання 3, за допомогою димотягів Д4 і Д6. При цьому враховуються висота шару обкотишів на випалювальних візках, що визначається датчиком $Д_{вшо}$, і швидкість переміщення випалювальних візків у продовж зон КМ, що контролюється датчиком $Д_{швв}$. Таким чином забезпечується регулювання газо-

Не дозволяється перекладання

повітряного потоку між зонами сушіння 1 і попереднього нагрівання 2, забезпечуючи заданий температурний режим у цих зонах.

Визначають температури датчиками ДТ1 і ДТ2 газоповітряних потоків, що надходить із зон випалювання 4 і рекуперації 5, і керують подачею атмосферного повітря у зону випалювання 4 через зону охолодження 7 регулюючи продуктивність димотягом Д5 через блок управління БУ1. Це дає можливість отримувати рівномірність спікання обкотишів у зоні випалювання 5 за висотою шару обкотишів.

Технологічною метою керування температурним режимом термічної обробки обкотишів вважатимемо стабілізацію температури газоповітряних потоків у кожній технологічній зоні КМ із мінімальними відхиленнями від заданих значень. Тому алгоритм роботи АСУ димотягами враховує нестаціонарність параметрів процесу термічної обробки обкотишів, що пов'язана з коливаннями фізико-хімічного складу і порозності шару обкотишів, зміною параметрів технологічного устаткування, тощо. За допомогою спеціально розробленого алгоритму компенсується в процесі управління велика інерційність теплових процесів. Для цього основу алгоритму роботи АСУ димотягами складає застосування оперативного оцінювання параметрів процесу і використання адаптивного прогнозуючого керування процесами термічної обробки обкотишів. Це забезпечує покращення якісних характеристик обкотишів і знижує питомі витрати енергоносіїв.

Практична реалізація структурної схеми автоматизованої системи управління димотягами КМ пропонується виконати на сучасній елементній базі. В якості контролера може бути використано інтелектуальне реле Zelio Logic20BX/B фірми Schneider Electric або іншого типу. Для блоків управління БУ1, …, БУ3 необхідні частотні перетворювачі векторного типу, наприклад, типу HYUNDAI N5000. Вимірювання температур газоповітряних потоків виконується за допомогою пірометрів або інфрачервоних термометрів. Швидкість переміщення випалювальних візків упродовж зон КМ пропонується визначати за допомогою безконтактного датчика швидкості. Для вимірювання висоти шару на випалювальних візках у продовж технологічних зон КМ необхідно використати інтелектуальний імпульсний радіолокатор лазерний датчик. Вимір тиску газоповітряного потоку виконується за допомогою інтелектуального високоточного датчика надлишкового/абсолютного тиску.

6. Розподіл температури газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ при керуванні димотягів у функції температури газоповітряних потоків

Для визначення температури газоповітряного потоку на виході зони випалювання КМ потрібно врахувати: швидкість фільтрації через шар обкотишів V_0, м/с; щільність ρ, кг/м^3 і різницю тиску ΔP газоповітряного потоку до входу в шар і після нього, Па. На цю температуру впливають коефіцієнти: $К_{ШАР}$, що комплексно виражає вплив форми та розміри обкотишів, і β об'ємного розширення газу, К$^{-1}$. Враховуючи ці параметри, середньомасова температура

ПОЛЬКО ДЛЯ ОЗНАЙОМЛЕННЯ

шару обкотишів на виході із зони ($\theta_{\text{шових}}$) буде визначатися інтерпретацією формули Дарсі-Вейбаха:

$$\theta_{\text{шових}} = \left(\frac{\Delta P}{\frac{\left(K_{\text{ШАР}} V_0^2\right)}{2} \cdot \rho} - 1 \right) \frac{1}{\beta}. \quad (1)$$

Для знаходження у формулі (1) коефіцієнту $K_{\text{ШАР}}$ скористаємося формулою (2):

$$K_{\text{ШАР}} = 4 \cdot \psi_{\text{ШАР}} \cdot \frac{H}{d}, \quad (2)$$

де $\Psi_{\text{шар}}$ – коефіцієнт газодинамічного опору, (Па·м·с²)/кг; H – висота шару обкотишів, м; d – еквівалентний діаметр обкотиша, м, що визначається в такий спосіб:

$$d = k_{\text{ф}} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} d_{\text{ср}},$$

де $k_{\text{ф}}$ − коефіцієнт форми частинок шихти (для кулі $k_{\text{ф}}$=2/3); $d_{\text{ср}}$ – середній діаметр частинок шихти, м; ε − пористість шару обкотишів, м³/м³.

Коефіцієнт $\Psi_{\text{шар}}$ газодинамічного опору для шару залізорудних обкотишів залежить від числа Рейнольдса обкотишів. Тому скористаємося формулою наближеного значення, що наведена в [30] і добре узгоджується з експериментальними даними інших авторів:

$$\psi_{\text{ШАР}} = \frac{3200}{R_e}, \quad (3)$$

де Re – число Рейнольдса, що змінюється від 170 до 2000.

Однак зазначена залежність придатна для шарів з вузьким діапазоном пористості ε=0,45–0,50 м³/м³. Гранулометричний склад залізорудних обкотишів у реальних умовах представлений більш широким діапазоном фракцій і, як наслідок, газопроникність шару обкотишів буде нижче.

Для нормальної безперебійної роботи КМ потрібне забезпечення безперервної подачі газоповітряного потоку, необхідного для горіння палива і відводу продуктів згорання, що утворюються. Подача атмосферного повітря в зони КМ і видалення продуктів згоряння із зон КМ здійснюється димотягами. Основними параметрами, що визначають вибір димотягів, є необхідна їх продуктивність, витрати, напір і тиск газоповітряного потоку, тощо, визначаються математичними виразами, наданими в [2, 17, 24].

Не является переизданием

При дослідженні перерозподілу температури газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ приймаємо, що вхідними характеристиками для кожної наступної зони є виходи попередньої зони КМ. При цьому враховуємо, що змінюються параметри технологічної зони: довжина зони L, площа ліжку обкотишів S, через який прокачується газоповітряний потік. Враховуємо також зміну від зони до зони висоту шару обкотишів. У зоні випалювання додатково враховується тепло від спалювання газу.

Входами моделей для кожної технологічної зони КМ є: середньомасова температура шару обкотишів на вході в зону ($\theta_{\text{шовх}}$); середньомасова волога шару обкотишів ($U_{\text{шовх}}$) (тільки для зони сушки і попереднього нагрівання); швидкість переміщення випалювальних візків ($V_{\text{вв}}$); еквівалентний діаметр обкотишів (d); перепад тиску газоповітряного потоку при проходженні через шар обкотишів (Δp); температура газоповітряного потоку, що поступає в шар ($\theta_{\text{гпвх}}$).

Виходами моделей для кожної зони КМ є: середньомасова температура шару обкотишів на виході із зони ($\theta_{\text{шових}}$); середньомасова волога шару обкотишів ($U_{\text{шових}}$) (тільки для зони сушки і попереднього нагрівання).

Враховуючи, що входи і виходи технологічних зон КМ пов'язані рівняннями газодинаміки, теплообміну і масообміну, обрана основа для загальної математичної моделі. Ця модель у подальшому буде використана для управління розподілом газоповітряного потоку, що надходить із зони випалювання КМ у інші зони. Для математичних моделей зон випалювання, рекуперації та охолодження при керуванні газоповітряними потоками на КМ використаємо систему математичних виразів, що надані у роботі [20]:

$$\begin{cases} V_0 = \dfrac{-150\mu \cdot a + \sqrt{(150\mu \cdot a)^2 + 7\rho \cdot b \dfrac{\Delta\rho}{1{,}3H}}}{3{,}5\rho \cdot b}, \\ Q = V_0 \cdot S \cdot \varepsilon \cdot \dfrac{L}{V_{\text{ВВ}}} \cdot C_{\text{ДГ}} \left(\theta_{\text{гпвх}} - \theta_{\text{гпвих}}\right), \\ \theta_{\text{гпвих}} = \theta_{\text{гпвх}} + \dfrac{k \cdot Q \cdot V_{\text{ВВ}}}{L \cdot G_{\text{совх}} C_O}, \end{cases} \qquad (4)$$

де μ – динамічна в'язкість газоповітряного потоку; α і b – розрахункові коефіцієнти що залежить від розміру та форми обкотишів; Q – підвід тепла до обкотишів від газоповітряних потоків інших зон; ε – пористість шару обкотишів; k – коефіцієнт тепла що витрачається на підігрів обкотишів; $G_{\text{СОВХ}}$ – витрати теплоносія на підігрів обкотишів; $C_{\text{о}}$ – питома теплоємність обкотишів; $C_{\text{ДГ}}$ – питома теплоємність газоповітряних потоків.

Для технологічної зони випалювання і наступних зон волога шару обкотишів $U_{\text{ШО}}$ дорівнює нулю. Ця волога раніше випарувалася низькотемпературним газоповітряним потоком у технологічних зонах сушки і попереднього нагрівання. Тому, математичні моделі зон сушки і попереднього нагрівання при керуванні газоповітряними потоками по зонам КМ доповнюємо

Только для ознакомления

систему математичних виразів (4) рівнянням (5):

$$U_{\text{ШОВИХ}} = U_{\text{ШОВХ}} - \frac{(1-k)\cdot Q\cdot V_{\text{ВВ}}}{L\cdot G_{\text{СОВХ}}\cdot\lambda}, \tag{5}$$

де k – коефіцієнт тепла що витрачається на підігрів обкотишів; λ – питома теплота випаровування води.

При дослідженні перерозподілу параметрів газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ прийнято, що вихідними характеристиками цих потоків для кожної наступної зони є виходи попередньої технологічної зони.

5. Дослідження параметрів газоповітряних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації КМ

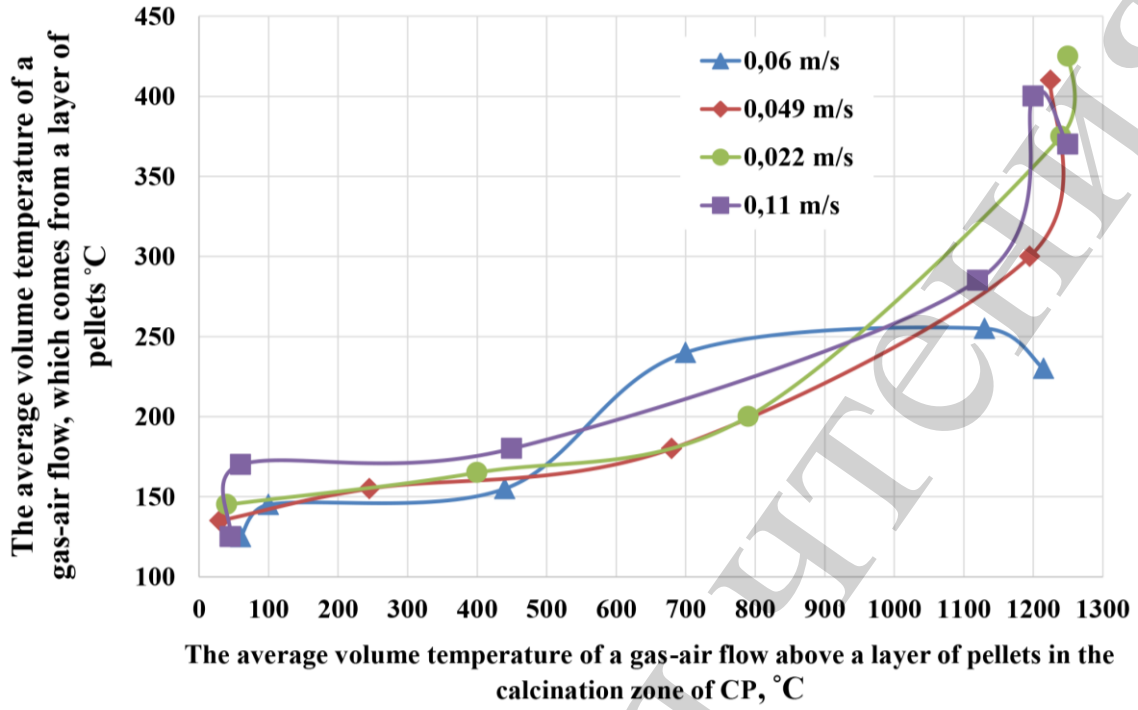
Дослідження параметрів газоповітряних потоків на виходах із зон випалювання і рекуперації виконаємо на прикладі КМ типу ОК-306, використовуючи математичні вирази (1)–(3). Математичним шляхом розраховано залежності середньооб'ємних температур газоповітряних потоків $\theta_{\text{гпвих}}$ температур газоповітряних потоків на виході із зон випалювання і рекуперації КМ.

При розрахунку температури газоповітряного потоку $\theta_{гпвих}$, що виникає на виході із шар котунів, за формулою (1) враховано: фільтрацію газоповітряного потоку через шар обкотишів V_0, яка становить 0,9 м/с; щільність ρ − 1,26 кг/м^3, різницю тиску ΔP газоповітряного потоку до входу в шар і після нього – 3040 Па, і коефіцієнт β об'ємного розширення газу − 0,003661 К$^{-1}$. Так як на температуру газоповітряного потоку $\theta_{\text{гпвх}}$, що поступає в шар, впливає коефіцієнт $К_{\text{ШАР}}$, то його розраховано за формулою (2). Він комплексно виражає гранулометричний склад шару обкотишів, шляхом впливу форм частинок шихти та розмірів обкотишів. Коефіцієнт форми частинок шихти $k_{\text{ф}}$ прийнято для кулі рівним 2/3, а середній діаметр частинок шихти $d_{\text{ср}}$ − 4,6 мм. У розрахунках прийнято пористість шару обкотишів рівною 0,45 м³/м³ при висоті шару обкотишів 0,45 м. Коефіцієнт $\Psi_{\text{шар}}$ газодинамічного опору для шару залізорудних обкотишів розраховано по формулі (3), він склав 11,76 при числі Рейнольдса рівним 272.

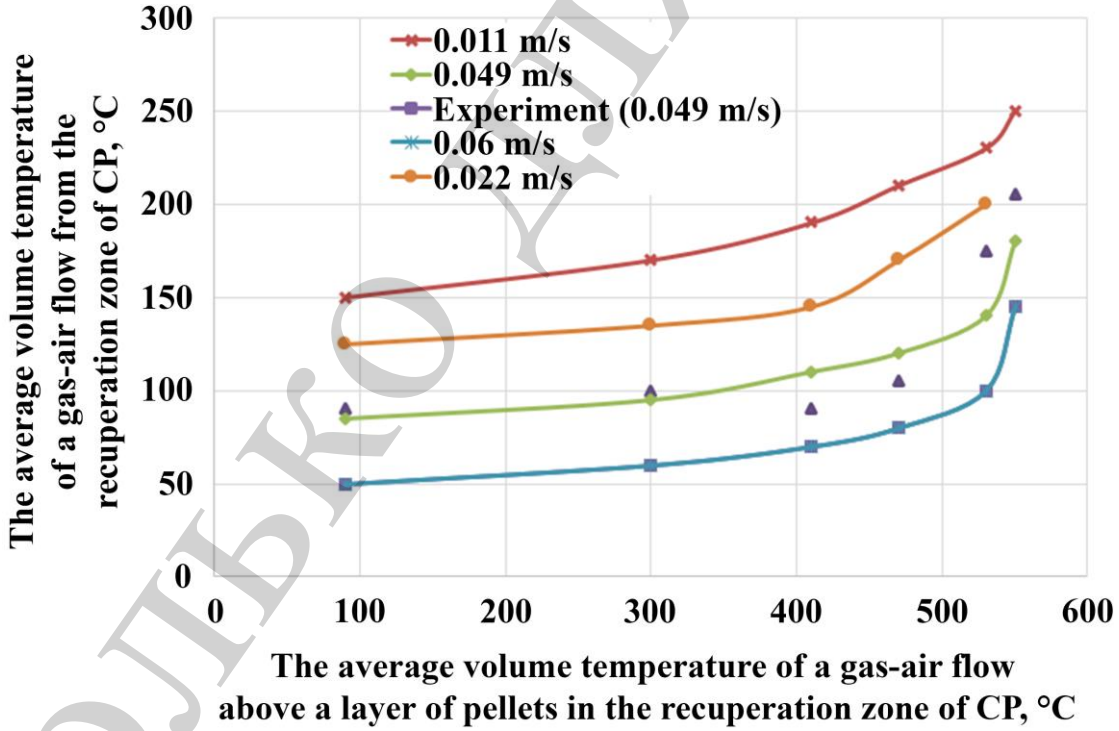
Визначення середньооб'ємних температур газоповітряних потоків $\theta_{\text{гпвих}}$ на виході із зони випалювання у функції зміни температур цих потоків, які існують над шаром обкотишів у зоні випалювання КМ, представлено на графіках рис. 2, *а*. Як відомо, зміна швидкості переміщення випалювальних візків КМ приводить до коливань температури газоповітряного потоку на виходах досліджуваних технологічних зон. Тому розрахунки виконані при швидкостях переміщення випалювальних візків: 0,06 м/с; 0,049 м/с; 0,022 м/с і 0,011 м/с та при постійній температурі газоповітряного потоку, що подається із технологічної зони охолодження величиною 450 °С. Аналогічні характеристики розраховані для зони рекуперації КМ при тих же даних, що використані при

Не является переизданием

розрахунках для зони випалювання. Характеристики для зони рекуперації представлені на рис. 2, *б*.



а



б

Рис. 2. Зміни середньооб'ємних температур газоповітряних потоків $\theta_{гпвих}$, що надходить із шару обкотишів технологічних зон:
а – випалювання; *б* – рекуперації

Только для чтения

Як показує аналіз отриманих характеристик, представлених графіками на рис. 2, середньооб'ємні температури газоповітряних потоків на виході із зон випалювання і рекуперації КМ суттєво залежить від температури газоповітряного потоку, що існує над шаром обкотишів у цих зонах. Так для зони випалювання ця температура змінюється практично лінійно до температури газоповітряних потоків над шаром обкотишів у 1100 °С, а для зони рекуперації – 500 °С.

Для перевірки достовірності розрахункових характеристик зміни температур газоповітряних потоків $\theta_{гпвх}$, що поступають в шар обкотишів зон випалювання і рекуперації КМ і на виході з цих зон вихідних середньооб'ємних температур $\theta_{гпвих}$, отриманих математичним шляхом, проведені експериментальні дослідження. Вимірювання температур газоповітряного потоку виконувалось за допомогою інфрачервоного термометра, який має модель MS6550B. Діапазон вимірювання температури цим термометром складає від мінус 32 °С до 1650 °С із похибкою вимірювання ±1,5 %. Швидкість переміщення випалювальних візків у продовж зон КМ вимірялась за допомогою безконтактного датчика швидкості обертання серії GEL 247 (Lenord Bauer). Діапазон вимірювань швидкості переміщення випалювальних візків цим датчиком складав від 0 до 25 кГц.

Результат експерименту представлено графіком на рис. 2, *б*. Зміни середньооб'ємних температур газоповітряних потоків на виході з технологічних зон випалювання і рекуперації вимірялись при тих же значеннях температур газоповітряних потоків, що задавались математичним шляхом на входах у ці зони. Експеримент проведено при швидкості переміщення випалювальних візків у продовж зон КМ величиною 0,049 м/с. Результати розрахунку і експерименту, що представлено графіками на рис. 2, *б*, показали, що при швидкості переміщення випалювальних візків величиною 0,049 м/с температури газоповітряних потоків на виході із зони рекуперації до величини у 300 °С практично співпадають. Далі ці характеристики відрізняються, але не більше чим на 35 °С. Відносна похибка каналу вимірювання температури газоповітряних потоків складає 7 %, а вимірювання швидкості переміщення випалювальних візків − 2.5 %.

Середньооб'ємні температури газоповітряних потоків при виході із технологічних зон випалювання і рекуперації КМ функціонально залежить також від швидкості фільтрації цих потоків через шар обкотишів на випалювальних візках. Швидкість фільтрації газоповітряного потоку залежить від висоти і пористості шару обкотишів. Для забезпечення нормованого протікання термічного процесу виготовлення обкотишів потрібно підтримувати оптимальну висоту шару на випалювальних візках. Проте у виробничих умовах висота і пористість шару обкотишів на випалювальних візках від зони до зони КМ змінюється через висушування вологи, випалювання кальцію, коливання гранулометричного складу, тощо. Тому потрібно виявити вплив висоти шару обкотишів КМ на середньооб'ємну температуру газоповітряних потоків.

При виконанні розрахунків середньооб'ємної температури газоповітряних потоків висота шару на випалювальних візках приймалася рівною: 450 мм,

Не является переизданием

350 мм і 250 мм. При цьому пористість шару обкотишів залишалась рівною 0,45 м³/м³. Отримані характеристики, графіки яких представлені на рис. 3, мають вигляд експонент при одній і тій же газопроникності шару. Чим більше висота шару обкотишів, тим менша середньооб'ємна температура газоповітряного потоку на виході з технологічної зони КМ.

Як представлено у формулі (1), чим більша різницю тиску ΔP газоповітряного потоку до входу в шар і після нього, тим більше середньооб'ємна температура газоповітряного потоку $\theta_{гпвих}$, що надходить із шару обкотишів. При збільшенні швидкості проходу газоповітряного потоку через шар обкотишів середньооб'ємна температура на виході з зони випалювання обкотишів зменшується. Це підтверджується графіками, представленими на рис. 3, що враховують різницю тиску газоповітряного потоку до входу в шар обкотишів на випалювальних візках і після виходу із нього.

У розрахунках за формулами (1−3) прийнято різницю тиску газоповітряного потоку, що відповідають наступним величинами: 70 Па, 60 Па і 50 Па. При цьому тиск у газоповітряних камерах технологічної зони сушки складав 4000 Па. При збільшенні різності тиску швидкості газоповітряного потоку його температура на виході із зони випалювання зменшується по експоненціальному закону (рис. 3).

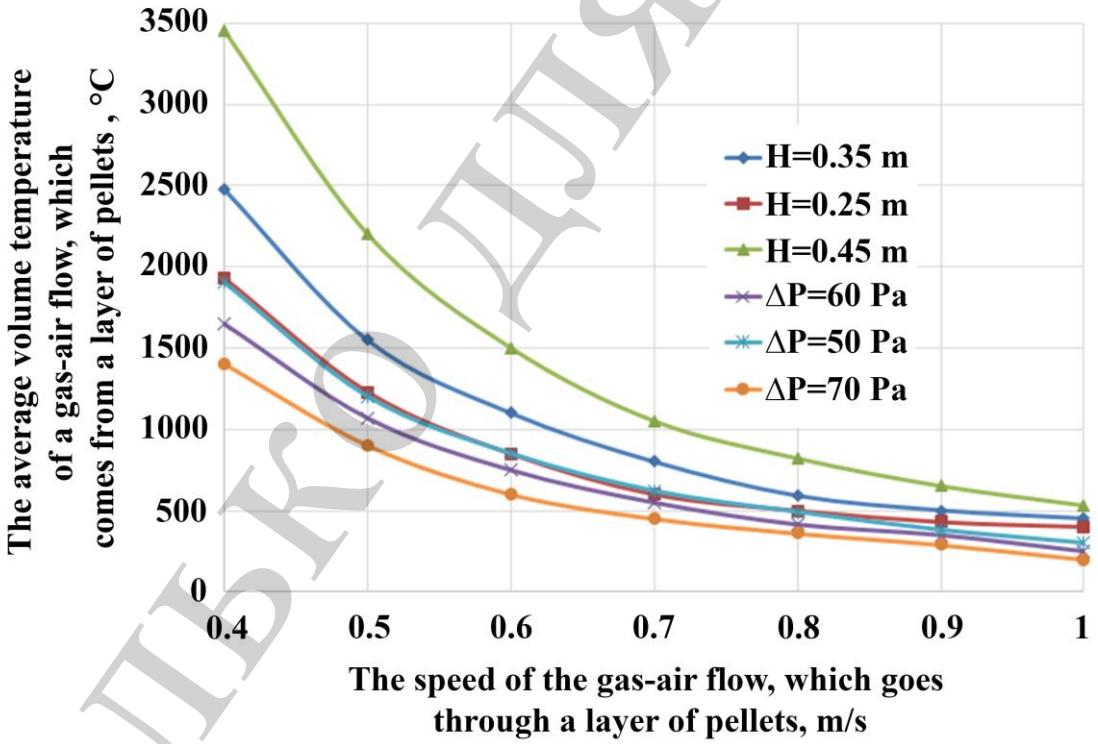


Рис. 3. Зміни середньооб'ємних температур газоповітряних потоків на виході із зони випалювання обкотишів від швидкості переміщення цих потоків з урахуванням висоти шару обкотишів і різниці тиску при вході та виході з шару обкотишів

При управлінні параметрами газоповітряного потоку АСУ димотягами забезпечується нормований розподіл тиску і температури газоповітряних

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

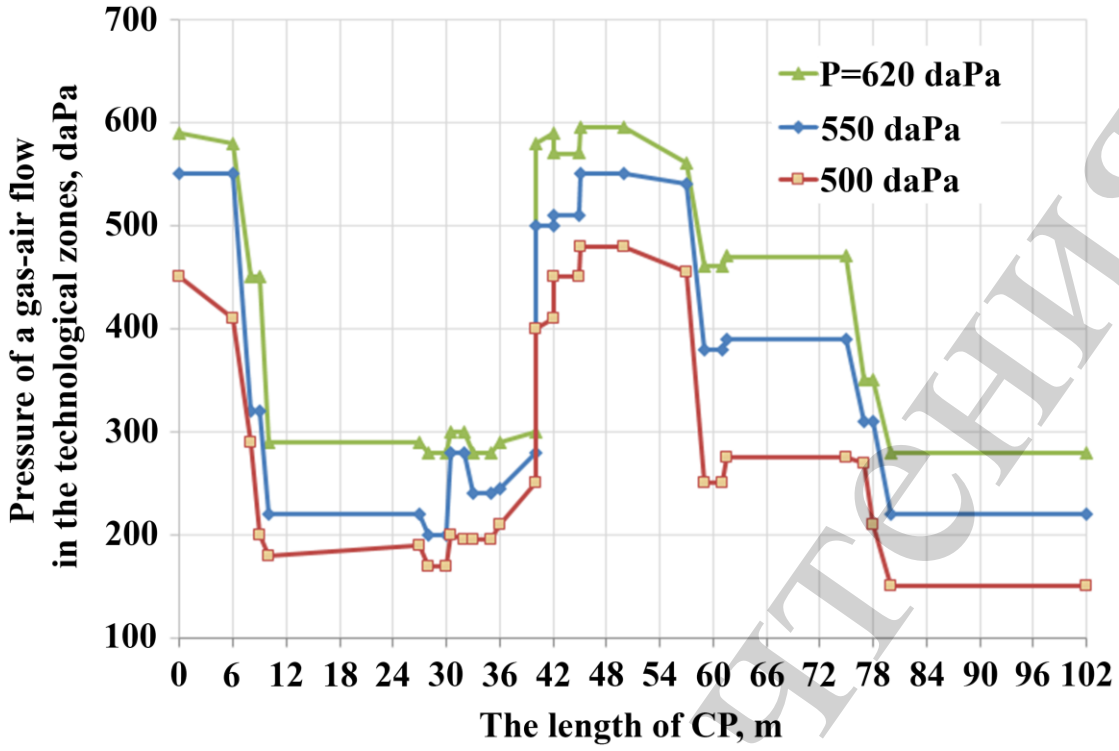
потоків по технологічним зонам КМ. АСУ димотягами працює у функції середньооб'ємних температур газоповітряних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації.

Для дослідження перерозподілу температур газоповітряного потоку між технологічними зонами КМ використовується загальна математична модель. В основу цієї моделі входять окремі математичні моделі для кожної технологічної зони КМ. Прийнято, що вихідними характеристиками цих моделей для кожної наступної зони є виходи попередньої моделі технологічної зони. Математичні моделі технологічних зон представляється рівняннями (4) і (5). Для виконання цих досліджень враховано: динамічну в'язкість газоповітряного потоку μ складала $53{,}6 \cdot 10^{-6}$ Па·с, розрахункові коефіцієнти α і b, що залежить від розміру та форми обкотишів, дорівнювали відповідно 0,07 і 0,59. Для зон сушки і попереднього нагрівання при керуванні газоповітряними потоками по зонам КМ коефіцієнти k тепла, що витрачається на підігрів обкотишів, відповідно дорівнюють 0,6 і 0,95. Втрати теплоносія на обробку обкотишів у зони випалювання $G_{\text{со.вх}}$ складає 4,42 м^3/год. Розрахункові питомі теплоємності обкотишів $C_{\text{о}}$ і газоповітряних потоків $C_{\text{ДГ}}$ складають відповідно 1,24 і 1,34 кг·°К. Довжина L кожної із зон випалювання і рекуперації складає по 16 м, а охолодження – 24 м потоками. Площа S ліжку обкотишів, через який прокачується газоповітряний потік, для кожної зони випалювання і рекуперації дорівнює 144 м^2.

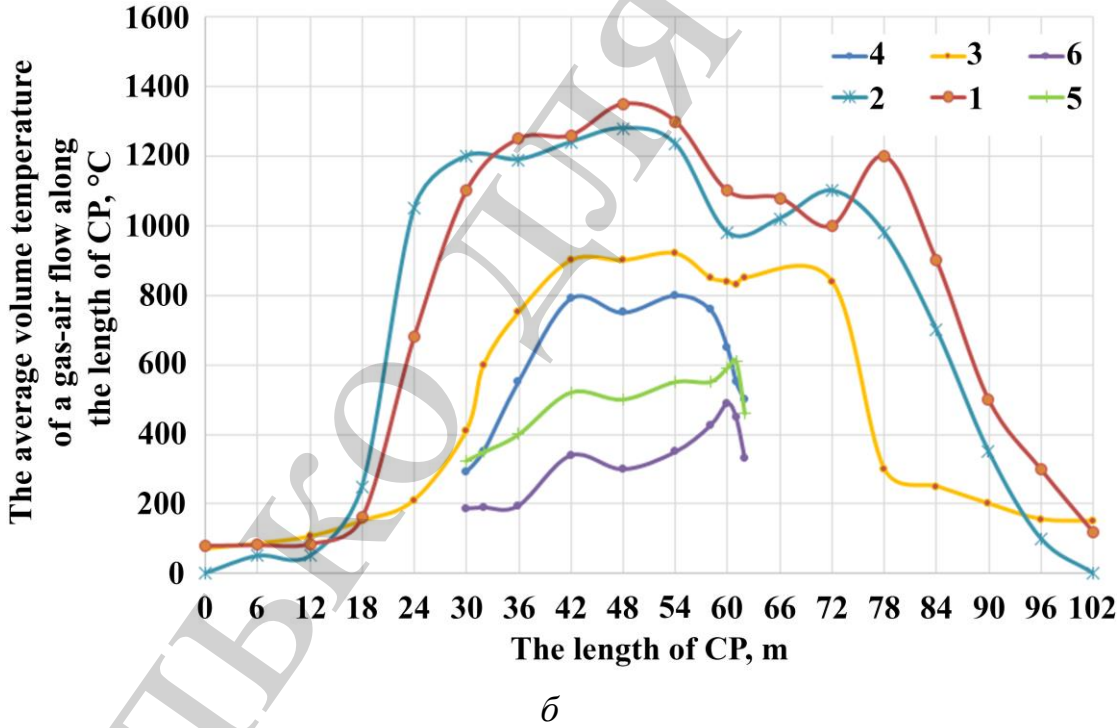
Розрахункові зміни параметрів газоповітряних потоків (тиску і температури) по довжині випалювальної машини типу ОК-306 представлено графіками на рис. 4. Графіки побудовані за допомогою математичних моделей технологічних зон випалювання, рекуперації та охолодження при керуванні газоповітряними потоками на КМ із використанням системи математичних виразів, що задано системою рівнянь (4) і (5). Математичні моделі зон сушки і попереднього нагрівання при керуванні газоповітряними потоками по зонам КМ доповнюють систему математичних виразів (4) рівняннями (5).

При розрахунках тиск газоповітряного потоку (рис. 4, *а*), що нагнітається димотягом із зони випалювання в зони сушіння і попереднього нагрівання, прийнято рівним: 500, 550 і 620 даПа. Одночасно нагніталося атмосферне повітря димотягом у технологічну зону охолодження. Тиск атмосферного повітря у газоповітряних камер зони охолодження складав 730 даПа. Цей тиск змінюється від зони охолодження до зони попереднього нагрівання КМ.

Не являється перекладом



а



б

Рис. 4. Графіки розрахунків параметрів газоповітряних потоків у технологічних зонах: *а* – тиску; *б* − середньооб'ємних температур над шаром обкотишів по довжині КМ і на виході з шару обкотишів у зонах випалювання і рекуперації

Найбільші значення тиску газоповітряного потоку досягається у зонах сушіння і випалювання обкотишів при максимальному значенні тиску газоповітряного потоку, що створюється димотягами (рис. 4, *а*). Таким чином досягається потрібна швидкість фільтрації газоповітряного потоку через шар

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

обкотишів для забезпечення рівня інтенсивності ведення теплообмінних процесів. На рис. 4, *б* представлені графіками 1−3, які відображують функціональні залежності зміни температур газоповітряних потоків над шаром обкотишів по довжині КМ. А графіки 4−6 на цьому рисунку визначають зміни середньооб'ємних температур газоповітряних потоків на виході з шару котунів у зонах випалювання і рекуперації. Графіки 1−3 і графіки 4−6 отримані при зміні тиску в зоні випалювання відповідно 5000 Па, 4500 Па і 4000 Па, постійній швидкості переміщення випалювальних візків 0,049 м/с, висоті шару обкотишів 450 мм і пористості шару обкотишів рівною 0,45 м³/м³.

Найбільше значення температури потоків досягаються у зонах випалювання і рекуперації КМ. Від значення цих температур залежить і температури потоків, що відходять із цих технологічних зон. Чим більше температури газоповітряних потоків в зонах випалювання і рекуперації, тим більше температури цих потоків на виході із цих зон при одній і тій же висоті шару котунів у 450 мм.

Отримані результати вказують на можливість використання температури газоповітряного потоку на виході зон випалювання і рекуперації для керування термічним процесом при виготовлені обкотишів. Тобто, температуру газоповітряних потоків на виходах із зони випалювання і рекуперації раціонально використовувати в автоматизованій системі управління димотягами КМ.

Для перевірки на адекватність правильності виконаних розрахунків ~~також~~ визначена зміна температури газоповітряного потоку на межі «шар – постіль» по довжині КМ.

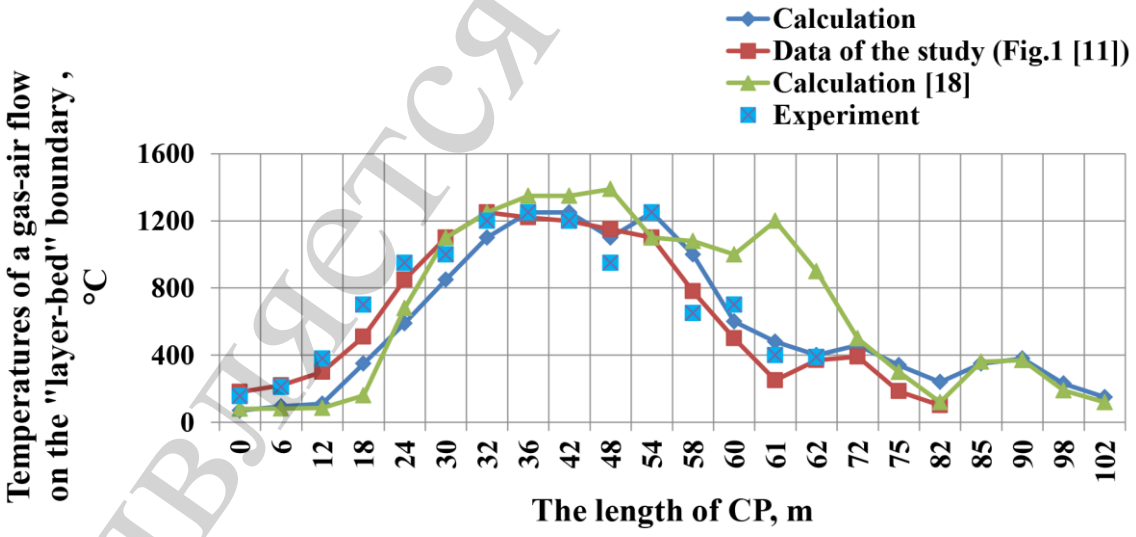


Рис. 5. Графіки порівнянь правильності виконаних розрахунків із аналогічними розрахунками, приведеними в наукових статтях [11, 18] і експериментальними даними

Експеримент виконано при постійному тиску газоповітряного потоку в зоні випалювання 4500 Па, швидкості переміщення випалювальних візків 0,049 м/с, висоті шару обкотишів 450 мм і пористості шару обкотишів рівною

Не является переизданием

0,45 м³/м³ Швидкість фільтрації газів через шар для зон сушіння і охолодження дорівнювало 1,2 нм^3/с, а для зон попереднього підігрівання, випалювання і рекуперації – 0,6 нм^3/с. Для отримання експериментальних даних температур на межі «шар–постіль» по довжині КМ використано інфрачервоний термометр моделі MS6550B. Для вимірювання висоти шару на випалювальних візках використано інтелектуальний імпульсний радіолокатор лазерний датчик типу DCRD1000A6 26Ghz, який має вихідний сигнал: 4−20 mA OrRS485 і протокол Modbus/RTU. Вимір тиску газоповітряного потоку виконано за допомогою інтелектуального високоточного датчика надлишкового/абсолютного тиску типу DMD 331-A-S-GX/AX.

Результати порівнянь правильності визначення зміни температури на межі «шар–постіль» по довжині КМ розрахункових і експериментальних даних наведено на графіках, що представлені на рис. 5. Відносна похибка виміру температури газоповітряного потоку не перевищує 12 %. Точність вимірювання висоти шару обкотишів цим датчиком склала ±5 мм,

Як показали результаті розрахунків зміни температури газоповітряного потоку на межі «шар–постіль» по довжині КМ, графік синього кольору, практично наближається до графіка отриманого розрахунковим шляхом, що наведений в [11] і не суттєво відрізняється від графіка в [18]. Таким чином, адекватність розрахунків підтверджена експериментально.

6. Обговорення результатів дослідження процесу перерозподілу газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ

Як показує аналіз графіків, що представлені на рис. 2, *а* зміна середньооб'ємної температури газоповітряного потоку, що надходить із шару обкотишів $\theta_{гпвих}$ на виході із зони випалювання КМ, практично лінійно залежить до температури 1100 °С газоповітряного потоку над шаром обкотишів у зоні випалювання. Проте після цієї температури газоповітряний потік стрімко змінюється до температури у 1250 °С по експоненціальному закону. Переміщення швидкості випалювальних візків вище 0,06 м/с приводить до зменшення середньооб'ємної температури газоповітряного потоку на виході із зони випалювання обкотишів, практично знижується до 200 °С. Це вказує на те, що шар обкотишів на випалювальних візках не встигає прогрітися і не досягає потрібного значення у нижніх шарах обкотишів.

Зміна середньооб'ємної температури газоповітряного потоку на виході із зони рекуперації КМ практично лінійно залежить цього потоку над шаром обкотишів по усій довжині КМ. Це підтверджується графіками, що представлені на рис. 2, *б*.

Збільшення швидкості переміщення випалювальних візків від 0,011 м/с до 0,06 м/с приводить до зменшення у 1,7 рази середньооб'ємної температури нагрітого газоповітряного потоку. Цей потік надходить із зони рекуперації КМ, при регламентній максимальній температурі у газоповітряній камері в 550 °С.

Збільшення висоти шару обкотишів на випалювальних візках на 30 відсотків (рис. 3) при постійній газопроникності цього шару приводить до зменшення по експоненціальному закону середньооб'ємну температуру газо-

ПОЛЬКО ДЛЯ ОЗНАЙОМЛЕННЯ

повітряного потоку в 2,5 рази на виході із зони випалювання КМ. Швидкість газоповітряного потоку через шар обкотишів при цьому складала 0,049 м/с. Тому потрібно оптимально підтримувати висоту шару величиною 450 мм, що регламентується на КМ типу ОК-306. Від висоти шару обкотишів на випалювальних візках залежить також різниця тиску газоповітряного потоку між входом та виходом його з шару. Ця залежність, як видно з рис. 3, є експоненціальною і визначається швидкістю переміщення цього потоку через шар обкотишів. Чим менша швидкість газоповітряного потоку, тим більша буде температури такого потоку на виході із зони випалювання КМ.

У результаті проведених досліджень зроблено наступний висновок. Збільшення висоти шару обкотишів на випалювальних візках КМ приводить до того, що середньооб'ємна температура газоповітряного потоку на виході із зони випалювання зменшується пропорційно. Більш того, зіставлення висот шару обкотишів свідчить про глибину проходження термічних процесів. Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного регулювання властивостями газоповітряного потоку безпосередньо димотягами КМ в умовах фабрики огрудкування. При зміні різниці тисків швидкостей рухів газоповітряних потоків від 340 Па до 250 Па (рис. 3) температура на виході із зони випалювання обкотишів змінюється до 30 відсотків. Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного керування термічним процесом виготовлення обкотишів на КМ. Слід зазначити, що порівняльні розрахунки виконані при зміні тисків газоповітряних потоків за допомогою димотягів від 500 даПа до 620 даПа і подачі цього потоку в зони сушки і попереднього нагрівання. Тут тиски газоповітряних потоків розподіляються по технологічним зонам КМ практично пропорційне. Це підтверджується розрахунками, представленими графіками на рис. 4, *а*. Зміна тиску цього потоку, що нагнітається димотягом, на 120 даПа змінює тиск потоку по усій довжині КМ у 1,4 рази.

Крім дослідження перерозподілу тисків газоповітряних потоків по технологічним зонам, проведені також дослідження перерозподілу температур цих потоків по цим зонам КМ. При проведені досліджень враховано, що АСУ димотягами працює у функції середньооб'ємних температур газоповітряних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації. Розрахункові зміни температур газоповітряних потоків по довжині випалювальної машини типу ОК-306 представлено графіками на рис. 4, *б*. Тиски газоповітряних потоків, що створюються димотягами із зони випалювання в газоповітряні камери сушіння, прийнято рівними із величинами: 620, 550 і 500 даПа. А розрідження попереднього нагрівання у газоповітряній камері складало 4000, 3500 і 3000 Па.

Із рис. 4, *б* видно, що перевищення температури газоповітряного потоку над шаром обкотишів помітно позначається і на середньооб'ємній температурі на виході із нього. При зміні тиску в зоні випалювання від 5000 Па до 4000 Па, постійній швидкості переміщення випалювальних візків 0,049 м/с, висоті шару обкотишів 450 мм і пористості шару обкотишів рівною 0,45 м³/м³ середньооб'ємні температури газоповітряного потоку на виході з шару обкотишів зон

Не является переизданием

випалювання і рекуперації може досягати зменшення до трьохкратної величини.

Подача газоповітряного потоку, призначеного для сушіння обкотишів на випалювальних візках, здійснюється продувом із зон випалювання і рекуперації КМ димотягами через газоповітряні камери. Для зони сушіння 1 (рис. 1) підтримуються температури газоповітряних потоків на рівні від 50 °С до 180 °С (рис. 4, *б*). Одночасно для зони сушіння 2 ці температури складають від 210 °С до 400 °С. У зоні сушіння створюється розрядження 2200 Па (рис. 4, *а*).

Вивчення результатів моделювання демонструє те, що температура газоповітряних потоків, що відсмоктуються з високотемпературних зон, може коливатися у значних межах. Задане значення їх температур підтримується співвідношенням кількості холодного повітря і спаленого природного палива. Для цього атмосферне повітря нагнітається димотягом і нагрівається у зонах охолодження 6 і 7. Прогріте повітря у зоні охолодження 6 подається у зони випалювання і рекуперації КМ. Тому температури газоповітряних потоків у цих зонах, як видно з рис. 4, *б*, суттєво змінюється. У зону сушіння 2 газоповітряний потік із зони охолодження 6 поступає прямим перетоком. Його температуру, що поступає у шар обкотишів, бажано підтримувати на рівні 350 °С (рис. 4, *б*). Це досягається за рахунок атмосферного повітря, що подається із зони охолодження 7, в яку атмосферне повітря нагнітається димотягом величиною 650 даПа. Якщо температури газоповітряних потоків на виході технологічної зони випалювання КМ є не достатніми, то потрібно додати теплоту від спалювання природного палива у пальниках, встановлених у цій зоні. При цьому на пальники зони випалювання подається атмосферне повітря із зони охолодження 6 у співвідношенні «газ-повітря» .

Розрядження в зоні випалювання автоматично підтримується на рівні 50–90 Па шляхом витрати повітря, що подається димотягом у зону охолодження 7. Процеси, що протікають у зоні попереднього нагрівання, і особливо випалювання, викликають стабілізацію температур у горні. Це забезпечує отримання міцних обкотишів. Стабілізація процесу нагрівання шару обкотишів, коли в ньому акумулюється постійна питома кількість тепла, сприяє і більш стабільною утилізації його в інших зонах, що призводить до загального підвищення темпів економічності термічного процесу.

Аналіз отриманих результатів вказують на те, що знаючи параметри температур газоповітряних потоків на виході із зон випалювання і рекуперації та управляючи тиском цих потоків і подачі їх у технологічні зони сушіння і попереднього підігріву нагрівання, керують термічним процесом при виготовлені обкотишів. Управління тиском газоповітряних потоку необхідно виконувати димотягами по спеціальному алгоритму, одночасно керуючи подачею атмосферного повітря в технологічні зони випалювання і рекуперації через зони охолодження КМ. При цьому застосовується оперативне оцінювання параметрів газоповітряних потоку і використовується адаптивне прогнозуюче керування процесами термічної обробки обкотишів. Тому середньооб'ємні температури газоповітряних потоків, що відходить із зон випалювання і рекуперації, раціонально використовувати в автоматизованій системі управління димотягами КМ.

ГОЛОВКО Д.Г. СТЕПАНЕНКО

Комп'ютерне моделювання дозволило дослідити вплив середньооб'ємних температур газоповітряного потоку із зони випалювання і рекуперації на термічний процес виготовлення залізорудних обкотишів. Отримані результати моделювання дозволяють спрогнозувати зміни температур у різних технологічних зонах КМ. Модель дозволяє досліджувати процес розподілу газоповітряного потоку між усіма технологічними зонами.

Отримані результати досліджень (рис. 5) не розходяться з практичними даними, добре відомими з робіт [4, 6, 19], які теж пов'язують зміну тривалості термічної процесу при виготовлені обкотишів із впливом на цей процес параметрів газоповітряного потоку. Але, на відміну від результатів досліджень, опублікованих в у цих роботах, отримані дані щодо впливу температури, тиску і швидкості газоповітряного потоку на процес термічної процесу при виготовлені обкотишів дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором термічного процесу при виготовлені обкотишів на КМ є перерозподіл високотемпературного газоповітряного потоку із технологічних зон випалювання і рекуперації між зонами сушки, попереднього нагрівання і охолодження, що дозволяє, заощадити енергоносії;

– раціональне використання атмосферного повітря у зоні охолодження при автоматичному управлінні димотягом і перерозподілі нагрітого у цих зонах потоків у технологічні зони випалювання і рекуперації;

– суттєвий вплив на термічний процес виготовлення обкотишів на КМ здійснює саме правильний вибір параметрів висоти шару обкотишів на випалювальних візках, різниці тиску при вході та виході із шару обкотишів, температури, тиску і швидкості переміщення газоповітряного потоку на виході із технологічних зон випалювання і рекуперації, а також тиску атмосферного повітря, що нагнітається димотягом у зони випалювання і рекуперації через зони охолодження.

Такі висновки можуть вважатися за доцільними з практичної точки зору, тому що дозволяють обгрунтовано підходити до визначення необхідного термічного процесу випалювання обкотишів на КМ. З теоретичної точки зору результати виконаних досліджень дозволяють стверджувати про визначення механізму керування термічним процесом вироблення обкотишів. Певною перевагою даного дослідження є те, що в автоматизованої системі використовується параметри газоповітряного потоку, що відходить із технологічних зон випалювання і рекуперації КМ.

Дослідження дозволило розробити і представити автоматизовану систему управління димотягами за середньооб'ємними температурами газоповітряних потоків на виході із технологічних зон випалювання і рекуперації, яка може бути використана в промислових умовах. У результаті роботи такої системи забезпечується покращення термічного процесу та газодинамічної роботи технологічних зон КМ.

Однак неможливо не відмітити, що результати досліджень вказують на неоднозначний вплив параметрів вихідного газоповітряного потоку на змінення механічної міцності обкотишів. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки

Не является передзданием

даного дослідження. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу фізико-хімічних властивостей в реальному часі на параметри газоповітряного потоку і протікання термічного процесу при виготовлені обкотишів. Недоліком дослідження є те, що дослідження виконані при використанні технічних параметрів тільки однієї КМ типу ОК-306, що є не достатнім і не повним.

Отримані результати корисні для змінювання нерівномірності умов теплової обробки обкотишів шляхом поліпшення рівномірності перерозподілу газоповітряних потоків впродовж технологічних зон КМ за рахунок оптимізації подачі газоповітряного дуття.

Дослідження по визначенню параметрів газоповітряного потоку на виході технологічних зон випалювання і рекуперації і вплив цього потоку на інші зони КМ раніше не проводились.

У подальшому вдосконалення цього дослідження можливо в напрямку керування термічним процесом виготовлення обкотишів на КМ із урахуванням впливу фізико-хімічного складу обкотишів на параметри газоповітряного потоку.

7. Висновки

1. Проведеними дослідженнями встановлено особливості протікання технологічного процесу випалювання обкотишів, які полягають у необхідності управляти димотягами за параметрами середньооб'ємних температур газоповітряних потоків, що є вихідними із зон випалювання і рекуперації обкотишів. Завдяки цьому можна стверджувати, що використані аналітичні залежності та розроблена структурна схема автоматизованого управління димотягами КМ враховують температури газоповітряних потоків. Для оперативного управління краще оцінювати параметри температур газоповітряних потоків, що відходять із зон випалювання і рекуперації КМ. Це дає можливість керувати газоповітряними потоками упродовж зон КМ, забезпечуючи нормований термічний процес виготовлення обкотишів.

Встановлено, що температури газоповітряних потоків залежать: від висоти шару обкотишів на випалювальних візках, різниці тиску при вході та виході із шару обкотишів і швидкості проходження цього потоку через шар обкотишів.

Задане значення їх температур може підтримуватися зміною атмосферного повітря при управлінні димотягом, що нагнітає його у зону охолодження КМ. У результаті забезпечується покращення теплової та газодинамічної роботи технологічних зон випалювання і рекуперації КМ.

2. Визначено перерозподіл температур газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ при управлінні димотягами у функціях середньооб'ємних температур газоповітряних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації. Для дослідження використано математичну модель. До складу моделі входить рівняння для визначення температури, тиску і швидкості газоповітряних потоків у технологічних зонах КМ. В основі математичної моделі враховано, що входи і виходи технологічних зон КМ пов'язані рівняннями газодинаміки, теплообміну і масообміну. При

Только для чтения

дослідженні розподілу температур газоповітряних потоків по технологічним зонам КМ прийнято, що вихідними характеристиками обкотишів для кожної наступної зони є виходи попередньої зони КМ.

Використовуючи результати компютерного моделювання при визначені впливу параметрів газоповітряних потоків із технологічних зон випалювання і рекуперації на термічний процес виготовлення залізорудних обкотишів, можна спрогнозувати зміни параметрів термічного процесу в інших зонах КМ. Модель дозволяє досліджуватти процес розподілу газоповітряних потоків між зонами сушіння, попереднього нагрівання, випалювання і охолодження. Результатом роботи є знайдені, на основі математичної моделі, дії управління димотягами, що, теоретично, призведуть до зменшення кількості необхідних енергоресурсів. Результати досліджень дозволять впровадити математичну модель у автоматизованій системі управління димотягами. Розроблена система може бути використана у промислових умовах.

Література

1. Кривоносов В. А., Пирматов Д. С. Контроль температуры окатышей в зоне сушки обжиговой машины на основе наблюдателя состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 8. С. 189–194.
2. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей: монография / Юрьев Б. П., Брук Л. Б., Спирин Н. А., Шешуков О. Ю., Гольцев В. А., Шевченко О. И., Метелкин А. А. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. 310 с.
3. Марков А. В. Применение UML-диаграмм и сетей Петри для проектирования ПО технологического процесса обжига окатышей // Сб. науч. тр. НГТУ. 2014. № 3 (77). С. 99–118.
4. Газодинамика слоя сырых окатышей на обжиговой машине / Абзалов В. М., Клейн В. И., Леушин В. Н., Шаврин С. В. // Сталь. 2003. № 1. С. 17–20.
5. Кривоносов В. А., Пирматов Д. С. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3.
6. Мных А. С. К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 7. С. 14–20.
7. Comparison of heating systems in conveyer roasting machines / Kopot’ N. N., Vorob’ev A. B., Goncharov S. S., Butkarev A. A., Butkarev A. P. // Steel in Translation. 2010. Vol. 40, Issue 3. P. 233–238. doi: https://doi.org/10.3103/s0967091210030095
8. Лобов В. Й., Лобова К. В. Нечітке управління режимом термічної обробки залізорудних котунів на конвеєрній машині // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2017. № 34. С. 182–191.
9. Lobov V., Lobova K., Koltiar M. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 4. P. 34–38.

Не является первоисточником

10. Абзалов В. М., Горбачев В. А., Клейн В. И. Методика оперативного определения коэффициента газодинамического сопротивления слоя окатышей // Сталь. 2000. № 12.

11. Опыт разработки и промышленного применения математических моделей для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине / Майзель Г. М., Буткарев А. А., Буткарев А. П., Некрасова Е. В., Дощицин Н. Ф. // Горная Промышленность. 2000. № 5. С. 45–47.

12. Butkarev A. A. Improving the control of pellet heat treatment in conveyer roasting machines // Steel in Translation. 2011. Vol. 41, Issue 5. P. 395–399. doi: https://doi.org/10.3103/s0967091211050056

13. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата / Боковиков Б. А., Брагин В. В., Малкин В. М. и др. // Сталь. 2010. № 9. С. 84–87.

14. Спирин Н. А., Лавров В. В., Рыболовлев В. Ю. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. 558 с.

15. Пирматов Д. С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине // Сборник трудов всероссийской конференции: Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2010. Воронеж, 2010. С. 88–89.

16. Lobov V. I., Kotliar M. O. Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2015. Issue 2. P. 109–117.

17. Мных А. С. Исследование сегрегации гранул по высоте слоя обеспечивающей исключение неравномерной тепловой обработки окатышей // Збірник наукових праць ДДТУ. 2015. № 2 (27). С. 148–153.

18. Математическая модель процесса обжига рудоугольных окатышей на конвейерной машине / Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г., Спирин Н. А., Лавров В. В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60, № 4. С. 329–335. doi: https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-4-329-335

19. Barati M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system // International Journal of Mineral Processing. 2008. Vol. 89, Issue 1-4. P. 30–39. doi: https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.09.008

20. Кривоносов В. А., Пирматов Д. С. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. № 5. С. 128–132.

21. Panic B., Janiszewski K. Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces // Metalurgija. 2014. Vol. 53, Issue 3. P. 331–334.

22. Pressure drop and mass transfer study in structured catalytic packings / Dai C., Lei Z., Li Q., Chen B. // Separation and Purification Technology. 2012. Vol. 98. P. 78–87. doi: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.06.035

23. A Simulation Study of Particles Generated from Pellet Wear Contacts during a Laboratory Test / Liu H., Jonsson L. T. I., Olofsson U., Jönsson P. G. // ISIJ

Только для чтения

International. 2016. Vol. 56, Issue 11. P. 1910–1919. doi: https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2016-328

24. Юрьев Б. П., Гольцев В. А. Изменение эквивалентной порозности слоя окатышей по длине обжиговой конвейерной машины // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60, № 2. С. 116–123. doi: https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-2-116-123

25. Guo L., Morita K., Tobita Y. Numerical Simulation of Three-Phase Flows With Rich Solid Particles by Coupling Multi-Fluid Model With Discrete Element Method // 2012 20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME 2012 Power Conference. Vol. 4. 2012. P. 371–382. doi: https://doi.org/10.1115/icone20-power2012-54053

26. CFD analysis of an induration cooler on an iron ore grate-kiln pelletising process / Croft T. N., Cross M., Slone A. K., Williams A. J., Bennett C. R., Blot P. et. al. // Minerals Engineering. 2009. Vol. 22, Issue 9-10. P. 859–873. doi: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.011

27. Pomerleau D., Desbiens A., Hodouin D. Optimization of a simulated iron-oxide pellets induration furnace // 11th Mediterranean Conference on Control and Automation. 2003.

28. Todd R. S., Webley P. A. Pressure Drop in a Packed Bed under Nonadsorbing and Adsorbing Conditions // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2005. Vol. 44, Issue 18. P. 7234–7241. doi: https://doi.org/10.1021/ie050378b

29. Рубан С. А., Лобов В. Й. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2008. № 1. С. 69–74.

30. Ксендзовский В. Р. Автоматизация процессов производства окатышей. М.: Металлургия, 1971. 216 с.

Не является переизданием