УДК 004.451.25: [622.788: 621.867]

О. В. МИТРОФАНОВ*, аспірант
Криворізький національний університет

КОМПЛЕКСНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ОБКОТИШІВ НА КОНВЕЄРНІЙ ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНІ

Мета. Розробка комплексної математичної моделі і вдосконалення методів, які спрямовані на підвищення ефективності дослідження процесу термічної обробки обкотишів на конвеєрній обпалювальної машині фабрики огрудкування гірничо-збагачувального комбінату за рахунок керування газоповітряної потоками конвеєрної обпалювальне машині, що збільшує її продуктивність і скорочує енергетичні витрати.

Методи досліджень. Для визначення параметрів потоку газоповітряних потоків по технологічним зонам і по довжині КВМ, необхідних для термічного оброблення обкотишів, використовуючи систему рівнянь тепло - і масообміну в шарі обкотишів, теплообміну між теплоносієм газоповітряного потоку і конвеєрним візком із шаром обкотишів на ньому та газодинаміки, розроблена математична модель. Отримана модель дозволить виконати дослідження газоповітряних потоків технологічної установки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці комплексної математичної моделі для дослідження термічного оброблення обкотишів у конвеєрній випалювальній машині при керуванні газоповітряними потоками

Практична значимість. Запропонована комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення обкотишів у конвеєрній випалювальній машині, що дозволить підвищити енергоефективність роботи машини, за рахунок раціонального використання відпрацьованих газоповітряних потоків.

Результати. Представлена розроблена комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення обкотишів у конвеєрній випалювальній машині, яка враховує одночасну роботу усіх технологічних зон. У моделі вхідними параметрами для кожної технологічної зони є виходи попередньої. Це дає можливість досліджувати термічне оброблення обкотишів при керуванні газоповітряними потоками у кожній технологічній зоні, виявити вплив їх на сусідні та по усій довжіні машини. Комплексна математична модель термічного оброблення обкотишів включає рівняння тепло - і масообміну в шарі, теплообміну між теплоносієм газоповітряного потоку і конвеєрним візком із шаром обкотишів на ньому та газодинаміки.

Ключові слова: конвеєрна випалювальна машина, газоповітряні потоки, комплексна модель, математичний опис.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-84-89

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасний етап розвитку конкурентоспроможного промислового виробництва залізорудних обкотишів характеризується використанням високоефективних технологій з необхідністю звести до мінімуму будь-які енергетичні втрати. Все це можливо тільки за умови істотного підвищення якості управління термічним обробленням обкотишів на конвеєрній випалювальній машині (КВМ). Зростаючі вимоги до управління технологічними режимами КВМ, що мають складний характер, обмежують застосування методів робастного і адаптивного управління так, як рішення має бути отримано в умовах неповноти інформації про динаміку термічного оброблення обкотишів і діючих на них збурень. Одним з напрямків вирішення завдання при обмежені інформації про фізико-хімічні властивості обкотишів та характеристики газоповітряних потоків, що протікають по технологічним зонам і впливають на термічне оброблення обкотишів на КВМ, може стати застосування методів інтелектуального управління. Однак застосування методів інтелектуального управління, які використовують різні підходи штучного інтелекту, такі як штучні нейронні мережі, нечітка логіка, машинне навчання, еволюційні обчислення або генетичні алгоритми, для систем управління термічним обробленням обкотишів практично не досліджено.

Підвищення економічної ефективності роботи КВМ може досягається шляхом зниження собівартості випалюваних обкотишів за рахунок зниження енерговитрат. Основним енергетичними витратами при оброблені обкотишів на КВМ є використання газового палива і електричної енергії. Одним із можливих шляхів зниження витрат газового палива може бути раціональне використання відпрацьованих газоповітряних потоків і перерозподіл їх у продовж технологічних зон КВМ, а також раціональне управління димотягами. Враховуючи, що в процесі термічного оброблення обкотишів на КВМ важливу роль відводиться спалюванню газу і розподілу газоповітряного потоку по технологічним зонам, то механізм рішення даної задачі знаходиться на цій технологічній стадії. Тому розробка високоефективних методів дослідження термічного оброблення обкотишів у КВМ із керуванням газоповітряних потоків, здатних забезпечити ви-

* © Митрофанов О. В.. 2019

рішення перерахованих завдань, компенсувати наслідки впливу нестаціонарних і / або невизначених факторів і збурень, є досить актуальною проблемою, яка має наукове і практичне значення.

Аналіз досліджень та публікацій. Вітчизняними та зарубіжними вченими присвячена значна кількість робіт, у яких представлені експериментальні та теоретичні дослідження процесів термічного оброблення обкотишів на КВМ [1-9]. Головним недоліком існуючих методів, розробок та технологічних рішень, є не можливість досліджувати розподіл і вплив газоповітряних потоків на термічне оброблення обкотишів, особливо по всій довжині КВМ.

Для дослідження процесів термічного оброблення обкотишів у наукових роботах авторами запропоновані різні математичні моделі, які описують тепло- та масообміні процеси при термічній обробці обкотишів, визначені головні залежності між параметрами процесу, показниками роботи КВМ та фізико-хімічного складу сирих обкотишів [10-18]. Проте відомі моделі не дозволяють досліджувати у повній мірі протікання у КВМ технологічних процесів. Математичні моделі дослідники використовують для дослідження окремих технологічних зон КВМ. У більшості надаються матеріали, в яких досліджуються зони сушіння, випалювання або охолодження. Комплексного підходу для побудови загальної математичної моделі для усіх одночасно працюючих технологічних зон автори в наукових роботах не розглядають. Удосконалення технологічного процесу випалювання обкотишів можливе за допомогою визначення в режимі on-line кількості хімічних мікроелементів, що входять у склад сирих обкотишів і впливають на температурні поля шару обкотишів та газоповітряні потоки, змінюючи їх вологість у технологічних зонах КВМ [19]. Задача вирішується за рахунок того, що спосіб управління включає використання керуючих впливів математичної моделі процесу, алгоритмів адаптації математичної моделі на поточний процес і алгоритмів оптимізації процесу термічного оброблення обкотишів, і в якому контролюють гранулометричний склад, насипну масу, хімічний склад і витрати сирих обкотишів і оперативно компенсують їх коливання. Згідно з дослідженням, під час виконання випалювання обкотишів у режимі реального часу авторами запропоновано проводити експрес-аналіз якості обкотишів шляхом здійснювати одночасно інфрачервону термографію, за допомогою якої визначають температурне поле шару та вологість обкотишів у кожній технологічній зоні КВМ, і атомно-емісійну спектроскопію, за допомогою якої визначають кількість в обкотишах хімічних мікроелементів Fe, Ca, O, Si, S, C, H тощо та їх співвідношення. У функції від кількості мікроелементів мінімізують енергоспоживання на виготовлення обкотишів. Практична реалізація цього способу потребує значних фінансових затрат і вимагає спеціальних умов для установки такого обладнання. В іншій роботі [20] запропоновано використання математичної моделі, яка включає повний опис кінетики, що протікають у шарі обкотишів при виконанні технологічних процесів сушіння, нагрівання, зміни фізико-хімічних процесів і зміцнення, забезпечуючи тим самим оптимальне управління процесом виготовлення обкотишів різного призначення. Ідея способу полягає у додатковому безперервному введені в математичну модель інформації про вагу конвеєрного візка з обкотишами. Для цього у кожній технологічній зоні КВМ використовуються з'єднані тензорезистори і термокомпенсатори за мостовою схемою на балці під колією підкладки. Модель дозволяє визначати газоповітряний динамічний режим, що впливає на шар обкотишів, мінімізувати енергетичні витрати на термічне оброблення обкотишів та забезпечити потрібну їх якість і максимальну продуктивність роботи КВМ. Запропонована модель не враховує вплив газоповітряного потоку на процес випалювання обкотишів, як у кожній технологічній зоні, так і в цілому по КВМ. Як показано у роботах [21-24], використання математичних моделей дозволяє досліджувати падіння тиску потоку в щільному шарі за висотою та зміною радіусу обкотишів У наведених моделях не враховуються вплив і перерозподіл параметрів газоповітряних потоків за технологічними зонами і вздовж усієї КВМ. Не визначення цих параметрів погіршує якість термічного процесу виготовлення обкотишів. Представлені результати досліджень математичних моделей у цих наукових працях не дозволяють розробити технічні рішення, що покликані забезпечити поліпшення газодинамічних характеристик у шарі. У найбільш сучасних дослідженнях використовують прогнозуючі ANFIS-моделі [25-28] для керування температурним режимом процесу випалювання обкотишів. Проте, відомі моделі не дають повного математичного опису про розподіл газоповітряного потоку по зонам КВМ.

Таким чином, як показали наукові дослідження і виконаний аналіз наукової і патентної літератури, математичне моделювання теплових, газоповітряних потоків і фізико-хімічних

процесів у технології термічного виготовлення обкотишів складуть наукову базу для створення інноваційної комплексної математичної моделі для дослідження термічного оброблення обкотишів на КВМ. Реалізація теплових режимів на новій моделі керування КВМ і її тривала експлуатація в часі зі збереженням високих техніко-економічних і екологічних показників виробництва буде характеризувати нову технологію, як передову на сучасному етапі розвитку виробництва випалених обкотишів.

Постановка завдання. Науковою задачею виконуваних досліджень є розроблення математичної моделі та вдосконалення методів, спрямованих на підвищення ефективності дослідження процесу термічного оброблення обкотишів у КВМ на фабриках обґрунтування гірничо-збагачувальних комбінатах за рахунок керування газоповітряними потоками КВМ, що збільшує її продуктивність й скорочує енергетичні витрати. Використовуючи досвід експлуатації сучасних КВМ і систему рівнянь тепло - і масообміну в шарі обкотишів, теплообміну між теплоносієм газоповітряного потоку і конвеєрним візком із шаром обкотишів на ньому та газодинаміки, розробити комплексну математичну модель, яка дозволить виконувати дослідження впливу газоповітряних мас на термічне оброблення обкотишів на КВМ з урахуванням одночасної дії газоповітряних потоків, як по окремим технологічним зонам і впродовж усієї довжини машини.

Викладення матеріалу та результати. У даний час відомо безліч математичних моделей термічного оброблення обкотишів, які дозволяють досліджувати і оптимізувати як різні режими процесу термічної обробки обкотишів, так і роботу його електроприводів вентиляторів і димотягів, а також окремих вузлів і агрегатів. При цьому більшість досліджень виконується на моделях, які містять одну технологічну зону або електропривод і описуються системами звичайних нелінійних диференціальних рівнянь, що дозволяють з достатньою точністю описати теплові та газоповітряні потоки, що впливають на випалювання обкотишів, або визначити електромагнітні процеси в двигунах. Проте склад вхідних впливів представляється обмежений. В останньому випадку є можливість досліджувати теплові процеси, що діють у технологічних зонах, а також коливальні процеси, які можуть впливати на роботу цієї зони і приводити як до додаткових витрат енергоносіїв при виготовлені обкотишів, так і до можливих порушень протікання технологічного процесу. Однак в процесі руху конвеєрних візків обкотиші відчувають більш складні коливальні рухи, які обумовлені зміною параметрів температур їх нагріву, нерівностями висоти і порістю шару обкотишів, їх фізико-хімічними властивостями. При цьому, у ділянки КВМ, що працюють під розрідженням, надходять підсосі атмосферного повітря, а ділянки, що знаходяться під тиском втрачають частину теплоносія. Наявні в шарах обкотишів температурні коливання від зони до зони, зменшують вплив динамічних зусиль і не забезпечують більш якісне виробництво обкотишів. Проте врахування дії цих збурень все одно призводить до того, що не враховується температурний режим попередніх зон і приходять до значних коливань температур, як над шаром обкотишів, так і середині нього під час руху конвеєрних візків. При цьому, кожен вид коливань може проявлятися окремо або спільно з іншими видами коливань. У зв'язку з цим, комплексна математична модель повинна, поряд із зонними коливаннями, враховувати і інші види коливань, що впливають при виготовлені обкотишів. Крім того, комплексна математична модель повинна включати в себе змінні, які характеризують і окремі параметри технологічних зон, а також параметри фізико-хімічного складу самих обкотишів і висоти та прозорість шару обкотишів, його складових частин і, особливо параметри газоповітряних потоків, що змінюються при взаємодії з шаром обкотишів у процесі руху конвеєрних візків. Це, в свою чергу, дасть можливість на комплексної математичної моделі паралельно досліджувати вплив температури газоповітряного потоку що діють на шар обкотишів, встановити причини появи коливань, їх характер і взаємний вплив, а також вплив коливань на термічні процеси в кожній технологічній зоні, визначати закони оптимального управління, для вирішення завдань оптимізації витрат енергоносіїв, а також визначати умови стійкого і якісного виробництва обкотишів при максимальній продуктивності роботи КВМ. Крім цього, комплексна математична модель дозволить проводити описані вище дослідження не тільки на різних швидкостях руху конвеєрних візків, які прийняті для кожного типу КВМ. але і на швидкостях властивих при їх збільшенні, що можливо забезпечить збільшення продуктивності КВМ. Це дозволить уточнити, для підвищених швидкостей руху конвеєрних візків, результати досліджень послідовної роботи технологічних зон, процесів термічної обробки, а також коливань

параметрів обкотишів. Останнє, є особливо актуальним, у зв'язку з тим, що коливання параметрів обкотишів безпосередньо залежать, з одного боку, від їх фізико-хімічного складу, тому що зі збільшенням швидкостей руху конвеєрних візків потрібно збільшувати амплітуду і частота коливань параметрів газоповітряного потоку, а з іншого боку, від збільшення швидкостей руху конвеєрних візків суттєво залежить якість випалюваних обкотишів і продуктивність КВМ.

Враховуючи досвід експлуатації КВМ розроблена комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення обкотишів на КВМ, яка представлена на рис.1. Модель дає можливість визначити газоповітряних потоків у кожній технологічній зоні та виявити вплив їх на сусідні.

Математична модель є з розподіленими параметрами і розроблена для КВМ з урахуванням наступних технологічних зон: сушіння 1 і 2, попереднього нагрівання, випалювання 1 і 2, рекуперації та сушіння 1 і 2. Вхідними параметрами для кожної технологічної зони є виходи попередньої. Проте для першої зон сушіння *1* вхідними сигналами є волога і висота шару сирих обкотишів, тиск газоповітряного потоку із зони охолодження *2*, швидкість конвеєрних візків і основність обкотишів. Вихідними сигналами для цієї зони є температура газоповітряного потоку над шаром обкотишів, волога і висота шару обкотишів. Для зони сушіння *2* і попереднього нагрівання додатковим вхідним сигналом є тиск газоповітряного потоку із зони випалювання *2*, а вихідні сигнали такі, як у зони сушіння 1. Зони попереднього нагрівання, випалювання *1* і *2* мають вихідні сигнали, які визначають температуру газоповітряного потоку над шаром обкотишів, питомі витрати палива і масу шару обкотишів. Додатковим вихідним сигналом зони випалювання *2* є температура газоповітряного потоку на виході шару обкотишів. Для зон випалювання *1* і *2*, рекуперації, сушіння *1* і *2* вихідними сигналами є температура газоповітряного потоку над шаром обкотишів і маса шару обкотишів. Окрім цього з виходу зони сушіння *1* під тиском газоповітряний потік подається на води зон випалювання *1* і *2* та рекуперації. У зони сушіння *1* і *2* вентиляторами *1* і *2* відповідно подається атмосферне повітря, тиск якого є вхідними сигналами для цих зон.

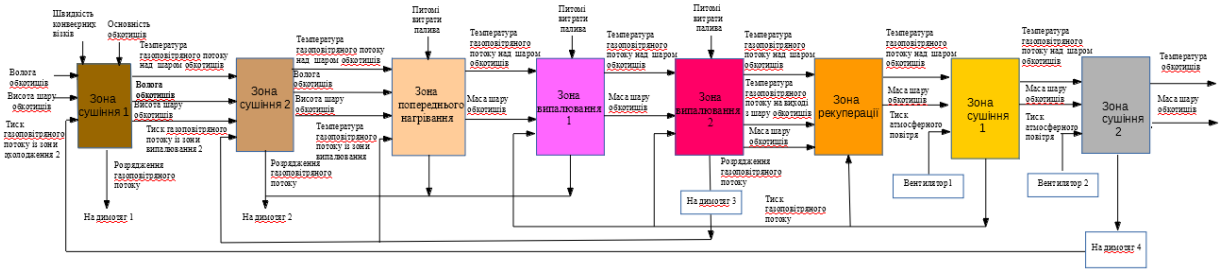

Рис. 1. Комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення обкотишів на КВМ

Математична модель термічного оброблення обкотишів включає рівняння тепло - і масообміну в шарі, теплообміну між теплоносієм газоповітряного потоку і конвеєрним візком із шаром обкотишів на ньому та газодинаміки. Система диференціальних рівнянь теплообміну в шарі обкотишів має вид

$$\begin{cases} -G_{sg}\left[\left(C_{sg}+C_{H_2O}\right)\dfrac{dt_g}{dy}+C_{H_2O}\left(t_g-t_M\right)\dfrac{dV_g}{dy}\right]=\dfrac{av}{m}\left(t_g-t_M\right); \\ \rho_{sch}\left(1-\varepsilon\right)\left[C_{sch}+V_{ok}C_{vl}-r_n\left(\dfrac{dV_{ok}}{s_{t_M}}\right)\right]\left(\dfrac{d_{t_M}}{d\tau}\right)=\left(\dfrac{a_V}{m}\right)\left(t_g-t_M\right); \\ G_{sg}\left(\dfrac{dV_g}{dy}\right)=-\left(\rho_{sch}\right)\left(\dfrac{db}{d\tau}\right), \end{cases}$$

де G_{sg} і C_{sg} – відповідно питомі витрати і теплоємність сухого газу; C_{H_2O} – питома теплоємність водяних парів; V_g – волога газу; V_{ok} – волога обкотишів; $V_{ok}=f(t_M)$; a_V – об'ємний коефіцієнт, $a_V=NU\lambda_g/d[6(1-\varepsilon)/d]$; τ – тривалість випалювання; r_n – теплота випаровування води, r_n=595-0,55t_{ns}; t_{ns} – температура насищення; m – коефіцієнт масивності, $m=1-\frac{1}{5}\left(\frac{a_f d}{2\lambda_M}\right)$.

При теплообміні між газоповітряним потоком і конвеєрним візком із шаром обкотишів на ньому температура газоповітряного потоку на виході технологічної зони визначається наступним чином

$$t_g^{вих} = t_g^{вх} - \left[\frac{C_m(t_m - t_n)}{w_g C_{sg}\rho\Delta\tau}\right],$$

де $t_g^{вх}$ і $t_g^{вих}$ – відповідно вхідна і вихідна температури газоповітряного потоку; t_n – початкова температури конвеєрного візка; $C_{sg}\rho$ – теплоємність газоповітряного потоку, що проходить через шар обкотишів і конвеєрний візок.

Рівняння газодінаміки визначає падіння тиску по довжені технологічної зони Δp_i , що визначається сумою падінь тисків на елементарних дільницях по висоті шару обкотишів і падінням тиску на колосниках конвеєрного візка

$$\Delta p_s(z) = \int_0^y \Delta p(z) + \Delta p_k(z).$$

Висновки. Представлені у статті матеріали є результатом розроблення комплексної математичної моделі та вдосконалення методів, спрямованих на підвищення ефективності дослідження процесу термічного оброблення обкотишів у КВМ на фабриках обґрунтування гірничо-збагачувальних комбінатах. Модель дозволяє досліджувати термічне оброблення обкотишів з урахуванням одночасної дії газоповітряних потоків, як по окремим технологічним зонам і впродовж усієї довжини машини. Керування газоповітряними потоками КВМ збільшує її продуктивність й скорочує енергетичні витрати. Представлена система рівнянь тепло- і масообміну в шарі обкотишів, теплообміну між теплоносієм газоповітряного потоку і конвеєрним візком із шаром обкотишів на ньому та газодинаміки складає математичне забезпечення для комплексної моделі. Запропонована комплексна математична модель можуть бути використані при комп'ютерному моделюванні, розробці та експлуатації КВМ на промислових підприємствах, що дозволить підвищити енергоефективність її роботи.

Список літератури

1. Оптимизация работы тракта эксгаустера обжиговой машины ОК-108 АО ССГПО для увеличения производства окатышей [Текст] / А. А. Буткарев [и др.] // Сталь. - 2015. - № 3. - С. 12-15 : - (Доменное производство).

2. Отработка технологических режимов термообработки окатышей на модернизированной обжиговой машине ОК-124 [Текст] / А. А. Буткарев [и др.] // Сталь. - 2010. - N 3. - С. 16-19 :. - ISSN 0038-920X.

3. **Лобов В.Й.** Синтез модального регулятора для процесу випалу обкотишів у конвеєрній печі фабрики огрудування / **Лобов В.Й., Нескоромна М. В.** // Вісник Криворізького національного університету. - 2016. вип. 42, - С.222-226. Режим доступу до журн.: http://visnykknu.com.ua/wp-content/uploads/file/Visnyk42.pdf

4. Особенности практического использования методологии ВНИИМТ для оптимизации теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин [Текст] / Буткарев А. А. // Металлург. - 2011. - N 4. - С. 38-43. ISSN 0026-0827.

5. О роли зоны тепловой инерции при термообработке окатышей на обжиговых конвейерных машинах [Текст] / **Б.А. Боковиков, В. В. Брагин, В. С. Швыдкий** // Сталь. - 2014. - № 8. - С. 43-48.

6. Теплофизические закономерности в основе инновационной теплотехнической схемы обжиговой машиныМОК-1-592 [Текст] / А. А. Лавриненко [и др.] // Сталь. - 2017. - № 12. - С. 6-12 .

7. **Lobov V.I.** The research of the process of iron ore pellets layer heat treatment in the combustion chamber of a belt kiln / **Lobov V.I.,**, **Kotliar M.A.** // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. - 2015. – No 3, p. p. 131-136. Режим доступу до журн.: http://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/54-03/8329-2015-03-lobov/0

8. **Лобов В.Й., Лобова К.В.** Нечітке управління режимом термічної обробки залізорудних котунів на конвеєрній машині /Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 34. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2017. – С. 182-191 – (Технічні науки). Режим доступу до журн.: http://eir.pstu.edu/handle/123456789/13818

9. **Lobov V.** Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. **Lobov V., Lobova K., Koltiar** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No 4, p. p. 34-38. Режим доступу до журн.: http://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/MMI_2015_4/005-Lobova.pdf

10. 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.

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

12. **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.

13. **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

14. **Lobov V.I.** Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone / **Lobov V.I.**, **Kotliar M.O.** //Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. - 2015. – No 2, p. p. 109-117. Режим доступу до журн.: http://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/53-02/8301-2015-02-lobov/0

15. 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

16. **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

17. **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.

18. **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.

19. Патент № 109810 Україна. МПК C22B 1/02 (2006.01), G01N 21/00. Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / **Лобов В.Й., Лобова К.В., Кривенко Т.А**.; заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № u201601988; заявл. 29.02.2016; 12.09.2016, Бюл. №17.

20. Патент № 118787 Україна. МПК C22B F27 B G01G19/22 (2006/01). Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / **Лобов В.Й., Лобова К.В., Кривенко Т.А.;** заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № a201610043; заявл. 03.10.2018; 11.03.2019, Бюл. № 5.

21. **Абзалов, В. М.** Газодинамика слоя сырых окатышей на обжиговой машине/ **В.М. Абзалов, В.И. Клейн, В.Н. Леушин, С.В. Шаврин** // Сталь. – 2003. – №1. – С. 17-20

22. **Кривоносов, В. А.** Контроль температуры окатышей по зонам обжиговой машины. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. – №8. С. 189-194

23. **Буткарев А. А.** Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах / **А. А. Буткарев** // Сталь. – 2011 – № 5. – С. 4-8.

24. **Мізерний В.М.** Аналіз стаціонарних режимів теплообмінних процесів у дисперсному шарі / **В.М. Мізерний, Т.А. Модебадзе** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 4. – С. 82–102.

25. **Neskoromna M.V.** Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant / **M.V. Neskoromna** // Widening our horizons. – 2016. – P. 42. 7

26. **Zade L. A.** "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", *Information Sciences*, part 1, 2, 3, n. 8 pp.199-249, pp.301-357, n. 9 pp. 43-80.

27. Прикладні нечіткі системи: Переклад з япон./**К. Асаї, Д. Ватада, С. Іваї та ін; під ред. Т. Тега, К. Асаї, М**. Сугено. - М.: Світ, 1993.

28. **Рубан С.А., Лобов В.Й.** Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей [Текст] // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – С. 69-74.

Рукопис подано до редакції 25.09.2019

УДК [658.562:622.7.016]: 66.085.3

Д. В. ШВЕЦ*, ст. преподаватель
Криворожский национальный университет

КОНТРОЛЬ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПОМОЩИ УЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ПОГЛОЩЕННОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель. Усовершенствование существующего ядернофизического метода контроля содержания общего железа в железной руде и продуктах переработки для повышения его точности в области высоких содержаний полезного компонента. Проведение экспериментальных исследований для определения зависимостей интенсивности рассеянного, поглощенного и интегрального гамма-излучения от содержания полезного компонента в железной руде.

Метод. Предложена модификация существующего ядернофизического метода, основанного на регистрации интенсивности рассеянного гамма-излучения (комптоновского рассеяния).

Научная новизна. Впервые предложено при анализе качества железорудных проб гамма-методом контролировать как интенсивность комптоновского рассеяния, так и учитывать количество поглощенных гамма-квантов (фотоэффект) в процессе облучения горной массы источником гамма-квантов.

Практическая значимость. Традиционный метод контроля с учетом интенсивности комптоновского рассеяния демонстрирует недостаточную точность при анализе качества богатых железных руд и продуктов переработки. Разработанный метод позволяет повысить точность измерения содержания общего железа в рудных пробах в облас-

* © Швец Д. В., 2019