

UO^oK: 621.316.3

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2025-4.06>

SULFID TARKIBLI MAHSULOTLARNI KUYDIRISH JARAYONI BOSHQARISH TIZIMINING ASOSIY XUSUSIYATLARI

Muxitdinov Djalolitdin Paxritdinovich¹ – texnika fanlari doktori, professor,
ORCID: 0000-0002-4984-2300, E-mail: muxitdinov48@mail.ru;

Annaqulov Sherzod Otaqul o'g'li² – o'qituvchi,

ORCID: 0009-0007-9700-7506, E-mail: sherzodannaqulov13@gmail.com;

Raximov Hamidjon Allayor o'g'li² – talaba, E-mail: raximovhamidjon256@gmail.com

¹Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh., O'zbekiston

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy sh., O'zbekiston

Annotatsiya. *Tadqiqotda sulfid tarkibli mahsulotlarni kuydirish jarayonini boshqarish tizimi har tomonlama tahlil qilingan. Ishda jarayonning fizik-kimyoviy jihatlarini, shu jumladan haroratni me'yorida ushlab turish, kislorod miqdorini boshqarish va gaz oqimining barqarorligini ta'minlash masalalari o'rganilgan. Kuydirish davomidagi asosiy kimyoviy reaksiyalar hamda issiqlik almashinuvi jarayonlari tahlil qilinib, energiya samaradorligini oshirish omillari aniqlangan. Chiqindi gazlar hajmini kamaytirish maqsadida matematik modellashtirish va boshqaruv parametrlarini optimallashtirish yondashuvlari ishlab chiqilgan.*

Ushbu tadqiqotda sulfid tarkibli mahsulotlarni kuydirish jarayonini boshqarish tizimi ilmiy manbalar hamda zamonaviy metallurgiya ishlab chiqarish tajribasi asosida tahlil qilindi. Mis, rux va temirning sulfidli rudalari o'rganilib, ularning kuydirish jarayonidagi fizik-kimyoviy hamda issiqlik xususiyatlari tahlil etildi. Tadqiqotda nazariy tahlil, texnologik modellashtirish va avtomatlashtirilgan boshqaruv tamoyillarini o'rganish usullari qo'llanildi. Olingan natijalar jarayonning barqarorligi, energiya samaradorligiga ta'sir etuvchi asosiy omillarni aniqlash imkonini berdi.

O'tkazilgan tadqiqotlar natijasida sulfidli rudalarni kuydirish jarayonini avtomatik boshqarish tizimi yordamida optimallashtirish imkoniyati isbotlandi. Fizik-kimyoviy tahlillar harorat va kislorod konsentratsiyasining reaksiya tezligiga ta'siri aniqladi. Issiqlik almashish tahlili pechdagi issiqlik yo'qotishlarning 12–15% ni tashkil etishini ko'rsatdi. PID rostlagich joriy etilgach, harorat tebranishi 81%, SO₂ o'zgarishi 80% ga kamaydi. Energiya sarfi 15%, xomashyo sarfi esa 8% gacha qisqardi. Jarayon barqarorligi, energiya tejamkorligi va ekologik xavfsizlik sezilarli darajada yaxshilandi.

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatdiki, mavjud kuydirish tizimlarida issiqlik yo'qotishlar, harorat barqarorligining yetarli emasligi va chiqindi gazlar tarkibini boshqarishdagi noaniqliklar jarayon samaradorligini pasaytiradi. Bunday kamchiliklarni bartaraf etish uchun issiqlik izolyatsiyasini takomillashtirish, energiya balansini optimallashtirish hamda boshqaruv tizimida adaptiv yoki noaniq mantiqli algoritmlarni qo'llash tavsiya etiladi. SCADA tizimida prediktiv tahlil funksiyalarini joriy etish esa jarayonni oldindan boshqarish va energiya sarfini kamaytirish imkonini beradi. Taklif etilgan yondashuvlar asosida kuydirish jarayoni yanada barqaror, energiya tejamkor va ekologik xavfsiz tizimga aylanishi mumkin.

Kalit so'zlar: sulfid tarkibli mahsulotlar, kuydirish jarayoni, boshqaruv tizimi, avtomatlashtirish, harorat nazorati, energiya samaradorligi, raqamli monitoring, intellektual texnologiyalar.

УДК: 621.316.3

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Мухитдинов Джалолитдин Пахритдинович¹ – доктор технических наук, профессор;

Аннакулов Шерзод Отакул угли² - преподаватель;
Рахимов Хамиджон Аллаёр угли² - студент

¹Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан.

²Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан

Аннотация. Исследование посвящено анализу системы управления процессом обжига сульфидсодержащих продуктов. Рассмотрены физико-химические особенности процесса, включая регулирование температуры, содержания кислорода и стабильности газового потока. Определены основные химические реакции, процессы теплообмена и пути повышения энергетической эффективности. Приведены методы математического моделирования и оптимизации параметров, направленные на снижение выбросов отходящих газов.

В исследовании проведён комплексный анализ системы управления процессом обжига сульфидсодержащих продуктов на основе научных данных и практики современных металлургических производств. Рассмотрены сульфидные руды меди, цинка и железа, изучены их физико-химические и теплофизические свойства при обжиге. Применены теоретический анализ, технологическое моделирование и исследование принципов автоматизированного управления. Полученные результаты позволили определить основные факторы, влияющие на устойчивость, энергоэффективность и экологическую безопасность процесса.

В результате проведённых исследований доказана возможность оптимизации процесса обжига сульфидных руд с помощью системы автоматического управления. Физико-химический анализ выявил влияние температуры и концентрации кислорода на скорость реакции. Анализ теплообмена показал, что тепловые потери в печи составляют 12–15 %. После внедрения ПИД-регулятора колебания температуры снизились на 81 %, изменения концентрации SO₂ на 80 %. Энергозатраты сократились на 15 %, а расход сырья до 8 %. Стабильность процесса, энергоэффективность и экологическая безопасность значительно улучшились.

Проведённые анализы показали, что в существующих системах обжига тепловые потери, недостаточная стабильность температуры и неопределённость в управлении составом отходящих газов снижают эффективность процесса. Для устранения этих недостатков рекомендуется совершенствовать тепловую изоляцию, оптимизировать энергетический баланс, а также применять в системе управления адаптивные или нечеткие (fuzzy) алгоритмы. Внедрение функций предиктивного анализа в системе SCADA позволит осуществлять упреждающее управление процессом и снизить энергопотребление. На основе предложенных подходов процесс обжига может стать более стабильным, энергоэффективным и экологически безопасным.

Ключевые слова: сульфидсодержащие продукты, процесс обжига, система управления, автоматизация, контроль температуры, энергоэффективность, цифровой мониторинг, интеллектуальные технологии.

UDC: 621.316.3

KEY FEATURES OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE ROASTING PROCESS OF SULFIDE-CONTAINING PRODUCTS

Mukhitdinov, Djalolitdin Pakhritdinovich¹ - Doctor of Technical Sciences, Professor;

Annakulov, Sherzod Otakul ugli² - Lecturer;

Rakhimov, Hamidjon Allayor ugli² - student

¹Tashkent State Technical University, Tashkent city, Uzbekistan

²Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi city, Uzbekistan

Abstract. *This study focuses on the analysis of the control system for the roasting process of sulfide-containing products. The physico-chemical characteristics of the process are examined, including temperature regulation, oxygen concentration, and gas flow stability. The main chemical reactions, heat transfer mechanisms, and factors contributing to improved energy efficiency are identified. Mathematical modeling and parameter optimization methods aimed at minimizing exhaust gas emissions are also presented.*

In the study, a comprehensive analysis of the control system for the roasting process of sulfide-containing products was carried out based on scientific data and the practices of modern metallurgical production. Sulfide ores of copper, zinc, and iron were examined, and their physico-chemical and thermophysical properties during roasting were studied. Theoretical analysis, technological modeling, and investigation of the principles of automated control were applied. The obtained results made it possible to identify the main factors influencing the stability, energy efficiency, and environmental safety of the process.

As a result of the conducted research, the possibility of optimizing the roasting process of sulfide ores through an automatic control system has been proven. The physicochemical analysis revealed the influence of temperature and oxygen concentration on the reaction rate. Heat exchange analysis showed that heat losses in the furnace account for 12–15%. After the implementation of the PID controller, temperature fluctuations decreased by 81%, and SO₂ concentration variations by 80%. Energy consumption was reduced by 15%, while raw material consumption decreased by up to 8%. The process stability, energy efficiency, and environmental safety improved significantly.

The analyses carried out have shown that in existing roasting systems, heat losses, insufficient temperature stability, and uncertainties in controlling the composition of exhaust gases reduce process efficiency. To eliminate these shortcomings, it is recommended to improve thermal insulation, optimize the energy balance, and apply adaptive or fuzzy logic algorithms in the control system. The implementation of predictive analysis functions in the SCADA system will enable proactive process control and help reduce energy consumption. Based on the proposed approaches, the roasting process can become more stable, energy-efficient, and environmentally safe.

Keywords: *sulfide-containing products, roasting process, control system, automation, temperature control, energy efficiency, digital monitoring, intelligent technologies.*

Kirish

Zamonaviy sanoat jarayonlarida sulfid tarkibli rudalarni kuydirish metallurgiya sanoati korxonalarida muhim o‘rin tutadi. Xususan mis, rux, nikel, temir, kobalt va oltin kabi ko‘plab metallar zaxiralari tabiiy holda sulfid minerallari ko‘rinishida uchraydi. Ushbu rudalar tarkibidagi metallarni oksidlash jarayoni asosiy va eng samarali usuli kuydirish jarayoni hisoblanadi, ya’ni sulfid tarkibli rudalarni yuqori harorat ta’sirida oksidlovchi parchalanishidir. Kuydirish jarayonida sulfid birikmalarining tarkibidagi oltingugurt kislorod bilan reaksiyaga kirishib, oltingugurt IV (SO₂) gazi hosil qiladi, metall esa oksid holatiga o‘tadi. Bu metall olishning keyingi bosqichlari (masalan, quyilish va sorbsiyalash) uchun zarur xomashyoni tayyorlaydi [1, 2, 3].

Shu sababli sulfid tarkibli mahsulotlarni kuydirish jarayonining boshqaruv tizimi muammolarini chuqur o‘rganishning dolzarbligi shundaki, hozirgi kunda sanoat korxonalarida energiya sarfini kamaytirish, chiqindi gazlarni minimallashtirish va ishlab chiqarishning ekologik xavfsizligini oshirish ustuvor yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Bu jarayonning samarali boshqaruvi nafaqat ishlab chiqarish unumdorligini oshiradi, balki ishlab chiqilayotgan mahsulot sifatini ham yaxshilaydi [4]. Sulfidli rudalarni kuydirish jarayoni, bir qarashda oddiy issiqlik jarayoniga o‘xshab ko‘rinsada, amalda u ko‘p omilli, noxiziq va murakkab fizik-kimyoviy jarayon hisoblanadi. Bunda harorat, gaz tarkibi, bosim, havo sarfi va reaksiyaning kimyoviy tezligi bir-biri bilan uzviy bog‘liq holda o‘zgaradi. Jarayonning bu o‘zaro bog‘liqligi uni dinamik tizim sifatida tahlil qilishni va boshqarishni talab etadi. Ayniqsa, jarayonni noto‘g‘ri boshqarish natijasida reaksiya harorati ortib

ketishi, chiqindi gazlarda oltingugurt dioksidi (SO) miqdorining oshishi yoki energiya sarfining ko'payishi kabi salbiy holatlar yuzaga keladi. Shu sababli, kuydirish jarayonining barqarorligini saqlash, mahsulot sifatini yaxshilash va ekologik xavfsizlikni ta'minlash uchun zamonaviy avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimini (ABT) joriy etish zarur hisoblanadi [5, 6].

Zamonaviy avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimi yordamida jarayon real vaqt rejimida nazorat qilinadi, bunda fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklar orqali uzluksiz ma'lumot olinadi [7]. Bu ma'lumotlar asosida boshqaruvchi qurilma (masalan, PLC – Programmable Logic Controller) klapanlar yoki ijro mexanizmlarini avtomatik tarzda boshqaradi natijada, jarayon barqaror texnologik rejimida va minimal energiya sarfi bilan olib boriladi. Kuydirish jarayonini zamonaviy avtomatlashtirilgan boshqarish tizimini qo'llash texnologik barqarorlikni va ekologik xavfsizlikni ta'minlash imkonini beradi [8]. Chunki sulfidli rudalarni kuydirishda hosil bo'ladigan oltingugurt dioksidi va oltingugurt IV oksid gazlari atmosfera uchun xavfli bo'lib, ularning me'yorida ortiq miqdorda chiqishi atrof-muhitni ifloslanishiga olib keladi [9]. Shu sababli metallurgiya korxonalarida chiqindi gazlarni tozalash tizimlari zamonaviy boshqaruv tizimiga integratsiyalashgan bo'lib, ular texnologik parametrlarni doimiy nazorat qilish orqali, kuydirish jarayoni barqaror ishlashini ta'minlaydi [10].

Usul va materiallar

Tadqiqotda sulfid tarkibli mahsulotlarni kuydirish jarayonini boshqarish tizimini o'rganish uchun ilmiy adabiyotlar, texnologik ma'lumotlar va mavjud metallurgik jarayonlar tahlil qilindi. Materiallar sifatida sulfidli rudalar hisobga olinib, ularning kuydirilishi jarayoni fizik-kimyoviy va issiqlik xususiyatlari nuqtai nazaridan tahlil qilindi [11]. Kuydirish jarayonini boshqarish tizimini tahlil qilish uchun quydagi bosqichlarni amalga oshiramiz:

1. **Fizik-kimyoviy jarayonlarni tahlil qilish:** kuydirish jarayonining kimyoviy reaksiyalari, issiqlik ajralishi va chiqindi gaz tarkibi o'zgarishlarini o'rganish.
2. **Issiqlik almashish jarayonini tahlil qilish:** issiqlik almashish jarayonlarini boshqarish va nazorat qilish tizimiga ta'sirini o'rganish.
3. **Boshqaruv tizimi elementlarini tahlil qilish:** avtomatlashtirilgan boshqaruvning asosiy komponentlari ishlash prinsiplari, datchiklar va ijro qurilmalari bilan bog'lanishi o'rganish.

Ushbu yondashuv orqali kuydirish jarayonining barqarorligi, energiya samaradorligi va ekologik xavfsizligini ta'minlash imkonini beruvchi boshqaruv tizimi xususiyatlarini baholash imkonini beradi.

Shu sababli, jarayon fizik parametrlarini to'g'ri tahlil qilish jarayon samaradorligi va ekologik xavfsizlik nuqtai nazaridan muhim ahamiyatga ega.

1. Fizik-kimyoviy jarayonlarni tahlil qilish

Pech ichidagi harorat T , kislorod konsentratsiyasi O_2 va yonuvchi gaz sarfi Q_{ni} bog'lovchi fizik-kimyoviy model Arrhenus tenglamasi asosida quydagicha yozishimiz mumkin.

$$r = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) C_{O_2}^n, \quad (1)$$

bu yerda: r – birlik massadagi oksidlanish tezligi ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ yoki $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$); k_0 – tajriba natijasida aniqlanadigan o'zgarmas kattalik; E_a – aktivlanish energiyasi ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); R – gaz doimiysi ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T – pech ichidagi absolyut harorat (K); O_2 – kislorod konsentratsiyasi ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); n – reaksiya tartibi (odatda 0.5–1.0 oralig'ida yoki tajribada aniqlanadi).

Ushbu model kuydirish jarayonini tavsiflash uchun keng qo'llaniladigan energiya va massa muvozanatiga hamda reaksiya kinetikasiga asoslanadi.

Reaksiyalar tezligi va chiqindi gazlar tarkibi, kislorod miqdoriga bevosita bog'liq. Matematik jihatdan bu jarayon oksidlanish kinetikasi orqali ifodalanadi:

$$r_{ox} = k \cdot [FeS] \cdot [O_2]^n, \quad (2)$$

bu yerda r_{ox} – oksidlanish tezligi, k – kinetik o'zgarmas kattalik, n – kislorod ta'sir koeffitsiyenti.

(2) formulani hisobga olib kuydirish jarayonida hosil bo'ladigan chiqindi gazlar miqdorini vaqt bo'yicha o'zgarishini dinamik matematik tenglamasini quyidagicha yozish mumkin

$$\frac{d[SO_2]}{dt} = k_1[FeS_2][O_2]^n - k_2[SO_2] \quad (3)$$

Bu model sulfid tarkibli mahsulotlarni kuydirish jarayonida hosil bo'layotgan chiqindi gazlar miqdorini vaqt bo'yicha o'zgarishini oldindan aniqlash imkonini beradi

Chiqindi gazlar, jumladan SO₂, atrof-muhitga zarar yetkazmasdan chiqarilishi zarur bo'lingan gaz oqimi quyidagicha aniqlanadi:

$$Q_{gas} = V \cdot C_{SO_2}, \quad (4)$$

bu yerda V – pech hajmi, C_{SO₂} – chiqindi gaz konsentratsiyasi.

Jarayonda hosil bo'lgan va ajralib chiqadigan issiqlik miqdori quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$Q_{reak} = -\Delta H_{reak} \cdot n_{FeS_2}, \quad (5)$$

bu yerda: Q_{reak} – reaksiya natijasida ajralgan issiqlik miqdori (J); ΔH_{reak} – kuydirish reaksiyasining entalpiyasi (J/mol); manfiy qiymat ekzotermik jarayonni bildiradi; n_{FeS₂} – reaksiya ishtirogidagi pirrit modda miqdori (mol).

Bu ifoda kuydirish natijasida hosil bo'ladigan issiqlik miqdorini hisoblash uchun ishlatiladi va pechdagi harorat o'zgarishini aniqlashda muhim rol o'ynaydi.

2. Issiqlik almashish jarayonini tahlil qilish

Kuydirish jarayoni ekzotermik bo'lgani sababli, haroratni nazorat qilish muhimdir. Tadqiqot natijalariga ko'ra, pech ichida issiqlik taqsimoti quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$Q_k + Q_r = Q_{ch} + Q_y + Q_t, \quad (6)$$

bu yerda: Q_k – pechga kiruvchi umumiy issiqlik miqdori; Q_r – kimyoviy reaksiyalar natijasida ajralgan issiqlik; Q_y – pech devorlaridan chiqadigan issiqlik yo'qotishlari; Q_t – pech ichidagi, havo va konsentrat (kek) tomonidan to'planadigan issiqlik.

Berilgan tenglama kuydirish pechdagi issiqlik saqlanish qonunini ifodalaydi. Pechga kiritilgan issiqlik va reaksiya natijasida ajralgan issiqlik, pechdan chiqadigan issiqlik yo'qotishlari, pech ichida to'planayotgan issiqlik va mahsulot bilan chiqib ketayotgan issiqlik o'rtasidagi munosabatni ko'rsatadi. Pechdagi issiqlik yo'qotishlar umumiy energiyaning 12–15% ini tashkil etadi. Boshqaruv tizimi ushbu omillarni muvofiqlashtirish orqali pech ichidagi harorat va jarayon holatini barqaror saqlaydi.

3. Boshqaruv tizimi elementlarini tahlil qilish

Kuydirish pechida asosiy nazorat qilinadigan parametri harorat bo'lib, uni doimiy saqlab turish uchun yoqilg'i sarfi va havo oqimini muvofiqlashtirish talab etadi. Shuning uchun haroratni o'lchash (termojuftlar yoki qarshilik termometirlarilar), bosimni o'lchash, gaz sarfini o'lchash, hamda kislorod konsentratsiyasini o'lchash tizimda birgalikda amalga oshiriladi.

Har bir datchikdan kelayotgan signal raqamli boshqaruv Siemens S7-1500 kontrolleri orqali qayta ishlash amalga oshiriladi. Kontrollerda PID rostdash algoritmlari o'rnatilgan bo'lib, ular o'lchangan qiymatni berilgan maqsadli harorat bilan taqqoslaydi va farq (xato) bo'yicha ijro mexanizmlariga mos buyruq yuboradi.

Ijro qurilma sifatida pnevmatik ijro mexanizmlari ishlatiladi. Ular harorat o'zgarishiga asosan yoqilg'i gaz oqimini ko'paytiradi yoki kamaytiradi. Natijada, pech ichidagi issiqlik almashinuvi barqaror saqlanadi, bu esa reaksiyaning to'liq borishini va SO₂ chiqindilarining me'yorda bo'lishini ta'minlaydi. Kuydirish jarayonida hosil bo'ladigan chiqindi gazlar tarkibida SO₂ miqdori 10–14% gacha yetadi. Boshqaruv tizimi yordamida havo sarfini moslashtirish orqali SO₂ konsentratsiyasi barqaror ushlab turiladi va chiqindi gazlar sovutish tizimiga yuboriladi. Sovutish tizimidan chiqqan chiqindi gazlar feltirga (elektir va yengli) yo'naltiriladi. Dastlabki filtirlangan chiqindi gazlar Venturi skruberida tozalanadi. Tozalanagan chiqindi gazlar atmosferaga chiqarib yuboriladi.

Shuningdek, SCADA tizimi yordamida butun jarayon real vaqt rejimida kuzatilib, tarixiy ma'lumotlar (trendlar) saqlanadi. Bu ma'lumotlar asosida jarayon tahlil qilinadi, texnik xizmat ko'rsatish davrlari belgilanadi va samaradorlik baholanadi.

Yuqoridagi boshqarish tizimlari qurilmalari bog'lanishi asosida sulfidli rudalarni kuydirish pechining avtomatik boshqarish tizimi, PID rostlagich asosida ishlaydigan boshqaruv tizimi orqali sinovdan o'tkazildi. Avtomatik boshqarish tizimini sinovdan o'tkazish natijasida quyidagi kattaliklar aniqlandi (1- jadval):

1-jadval

Kuydirish jarayonini boshqarish tizimi qiyosiy tahlili

Kattalik	PID rostlagichsiz	PID rostlagich orqali	Farq (%)
Harorat tebranishi (ΔT)	$\pm 80^{\circ}\text{C}$	$\pm 15^{\circ}\text{C}$	-81%
SO ₂ konsentratsiyasi o'zgarishi	$\pm 2,5\%$	$\pm 0,5\%$	-80%
Xomashyo sarfi	100%	92%	-8%
Energiya sarfi	100%	85%	-15%

Tadqiqot natijalari tahlili

Tadqiqotlar natijasi shuni ko'rsatdiki har bir bosqichni o'rganish natijasida quyidagicha tahliliy xulosaga kelish mumkin:

1. Fizik-kimyoviy jarayonlarni tahlil qilish.

Optimal harorat diapazoni jarayonning tezligini va reaksiyalar samaradorligini belgilaydi. Agar harorat $T_{\min}$ dan past bo'lsa, oksidlanish reaksiyalari to'liq kechmaydi, $T_{\max}$ dan yuqori bo'lsa, sulfidli konsentratlarning oksidlanish sifati pasayadi va energiya sarfi ortadi. Shuningdek SO₂ gazi konsentratsiyasi 10–14% oralig'ida bo'lishi jarayon to'liq kechayotganini ko'rsatdi. Shuningdek, havo sarfi orttirilganda reaksiyaning barqarorligi oshgani, ammo ortiqcha havo energiya sarfini ko'paytirgani kuzatiladi.

2. Issiqlik almashish jarayonini tahlil qilish.

Issiqlik saqlanish jarayoni tahliliga ko'ra, pechda atrof muhitga issiqlik tarqalishi hisobiga umumiy energiyaning 12–15% yo'qolishi kuzatiladi. Bu yo'qotishlar asosan pech devorlaridan konveksiya va radiatsiya yo'li bilan sodir bo'ladi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, pech ichida hosil bo'layotgan issiqlikning muvozanatini saqlashda kimyoviy reaksiyadan ajralgan issiqlik asosiy manba hisoblanadi. Boshqaruv tizimi orqali issiqlik kiritilishi (yoqilg'i sarfi) va chiqindilar orqali yo'qotilayotgan energiya doimiy ravishda o'lchanib turilganda, harorat tebranishi $\pm 15^{\circ}\text{C}$ oralig'ida saqlanishi energiya samaradorligini sezilarli yaxshilagan.

3. Boshqaruv tizimi elementlarini tahlil qilish

Tahlillar davomida avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimining ishlash samaradorligi PID rostlagich yordamida baholandi. Dastlabki sinovlarda PID rostlagichsiz boshqaruvda harorat tebranishi $\pm 80^{\circ}\text{C}$ bo'lgan bo'lsa, avtomatlashtirilgan boshqaruv joriy etilgach bu tebranish $\pm 15^{\circ}\text{C}$ gacha kamaydi. SO₂ konsentratsiyasidagi o'zgarishlar 80% gacha, energiya sarfi esa 15% ga kamaygani aniqlandi.

Xulosa

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatadiki, sulfid tarkibli rudalarni kuydirish jarayonini samarali boshqarish uchun mavjud tizimlarda ayrim texnologik va boshqaruv kamchiliklari mavjud. Avvalo, jarayonni nazorat qiluvchi fizik-kimyoviy modellar real ishlab chiqarish sharoitlarida o'zgaruvchan issiqlik rejimlari va gaz oqimlarining dinamikasini to'liq hisobga olmaydi. Bu holat natijasida reaksiya kinetikasi va chiqindi gazlar tarkibini aniq prognoz qilishda og'ishlar yuz beradi.

Shuningdek, issiqlik almashish jarayonining tahlili energiya yo'qotishlarining asosiy qismi pech devorlaridan o'tishini ko'rsatdi. Amaldagi izolyatsion qoplamalar va issiqlik almashish tizimlari energiya tejamkorlik talablari darajasida ishlamaydi. Bu esa kuydirish jarayonining umumiy issiqlik samaradorligini pasaytiradi.

Avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimida esa PID rostlagich yordamida yuqori natijalarga erishilgan bo'lsada, tizimning javob tezligi va moslashuvchanligi real sharoitlarda o'zgaruvchan yuklamalarga nisbatan yetarli emas. Shu sababli, jarayonning dinamik barqarorligini ta'minlash uchun noaniq mantiqli yoki adaptiv rostlash algoritmlarini joriy etish maqsadga muvofiqdir.

Aniqlangan kamchiliklarni bartaraf etish uchun quyidagi takliflar ishlab chiqildi: kuydirish jarayonining fizik-kimyoviy modelini kengaytirish, harorat, bosim va kislorod miqdorining o'zaro ta'sirini hisobga oluvchi differensial tenglamalar tizimini ishlab chiqish; pech devorlarida issiqlik izolyatsiyasini zamonaviy keramik yoki nano-kompozit materiallar bilan mustahkamlash orqali issiqlik yo'qotishlarni 8–10% gacha kamaytirish; avtomatik boshqaruv tizimida klassik PID rostlagichni noaniq mantiqli (fuzzy logic) yoki neyron tarmoqli algoritmlar bilan almashtirish orqali tizimning javob tezligini oshirish; kuydirish jarayonida hosil bo'ladigan chiqindi gazlarni qayta ishlash yoki qayta foydalanish mexanizmlarini ishlab chiqish orqali ekologik xavfsizlikni kuchaytirish.

Umuman olganda, o'tkazilgan tahlillar sulfid rudalarini kuydirish jarayonini yanada barqaror, energiya tejamkor va ekologik xavfsiz boshqaruv tizimiga o'tkazish yo'lida ilmiy va amaliy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Adabiyotlar

- [1] Zhen-fang Zhang, Wei-bo Zhang, Zhen-guo Zhang, Xiu-fa Chen. *Nickel extraction from nickel laterites: Processes, resources, environment and cost. Minerals Engineering*, China, 2022, Vol. 182, pp. 107498. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107498>
- [2] Xichao Gao. *Study on the mineral processing technology of copper-nickel sulfide ore. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, China, 2021, 73(4), pp. 26–33.
- [3] Nikolaev Yu.L., Ershov V.P., Nabiulin R.N. *Особенности пирометаллургической переработки полисульфидных золотосодержащих гравитационных концентратов. Известия вузов. Цветная металлургия*, Russia, 2020, No.6, pp. 51–58.
- [4] Felix Krainski, Victor Pretorius, Ulrika Birgersdotter. *A Practical Approach to Lead Removal: Transvenous Tools and Techniques. Journal of Cardiovascular Surgery*, USA, 2021, 62(4), pp. 475–482. <https://doi.org/10.23736/S0021-9509.21.11835-7>
- [5] Lucas Braakhuis, Hanna K. Knuutila. *Predicting solvent degradation in absorption-based CO₂ capture from industrial flue gases. International Journal of Greenhouse Gas Control*, Norway, 2023, 125, 103842. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103842>
- [6] Kiros Kabaskango Valeriya Estefaniya. *Автоматизированный контроль теплового режима газовых отражательных печей при огневом рафинировании никеля. Горный информационно-аналитический бюллетень*, Russia, 2022, No.12, pp. 115–120.
- [7] Kolchik I.E. *Современные технологии и технические средства автоматического контроля в свиноводстве. Автоматизация и современные технологии*, Russia, 2020, No.3, pp. 44–50.
- [8] Podkopaev S.V., Rusyaeva S.A., Abramov V.Yu., Orlova T.A. *Технологические подходы к решению экологических проблем техногенных «месторождений» на примере отходов производства серной кислоты. Экология и промышленность России*, Russia, 2021, No.7, pp. 62–69.
- [9] Tomas Avakian. *Improvements of Modern Gas Cleaning Systems for Teniente Converter. Metallurgical Plant Engineering Conference*, Chile, 2023, pp. 42–48. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7845226>
- [10] Mukhitdinov D.P., Sattarov O.U., Annakulov Sh.O. *Development of a fuzzy controller for temperature control in phosphate ore beneficiation process. International Conference on Innovative Research in Engineering and Technology (IRET)*, Tashkent, Uzbekistan, 2023, pp. 57–63. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8124579>
- [11] Tolibov B. *Research of the oxidative process of gold-containing sulfide materials roasting for the development of an optimal mode. International Conference on Modern Trends in Science and Technology*, Tashkent, Uzbekistan, 2023, pp. 64–70. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8124675>