ISSN:3030-332X
Impact factor: 9,493
International journal of scientific researchers

MIS ISHLAB CHIQARISH SANOATIDA GIDROMETALLURGIK JARAYONLARNING EKOLOGIK AFZALLIKLARI VA ISTIQBOLLARI

Mirkomilov Shuxrat Miromilovich
Dotsent,Tashkent State Technical University

Lutfullayeva Nargiza Boxodirovna
Katta o‘qituvchi,Tashkent State Technical University

Maxmudova Lola Mansur qizi
Talaba,Tashkent State Technical University
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20263765

Annotatsiya

Hydrometallurgy zamonaviy mis ishlab chiqarish sanoatida ekologik xavfsizlikni ta’minlash, energiya sarfini kamaytirish va kam tarkibli rudalarni samarali qayta ishlash imkonini beruvchi istiqbolli texnologik yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Mazkur maqolada mis ishlab chiqarishda qo‘llanilayotgan gidrometallurgik jarayonlarning ekologik afzalliklari, iqtisodiy samaradorligi va rivojlanish istiqbollari ilmiy jihatdan tahlil qilindi. Tadqiqot davomida gidrometallurgik va pirometallurgik texnologiyalar o‘rtasidagi asosiy farqlar energiya sarfi, zararli gazlar emissiyasi, chiqindilar hajmi hamda ekologik xavfsizlik nuqtai nazaridan solishtirildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, gidrometallurgik texnologiyalar atmosferaga chiqariladigan oltingugurt dioksidi va karbonat angidrid miqdorini sezilarli darajada kamaytiradi, past haroratlarda ishlashi sababli energiya tejamkorligini ta’minlaydi hamda kam tarkibli rudalarni qayta ishlashda yuqori samaradorlikka ega. Ayniqsa, Bioleaching texnologiyasi ekologik xavfsizligi va iqtisodiy samaradorligi bilan ajralib turadi. Shu bilan birga, reagentlardan foydalanish va chiqindi eritmalarni zararsizlantirish bilan bog‘liq ayrim ekologik muammolar mavjudligi qayd etildi. Maqolada gidrometallurgik texnologiyalarning zamonaviy “yashil metallurgiya” tamoyillari asosida rivojlanishi, qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalashuvi hamda bio-gidrometallurgik usullarning istiqbollari keng yoritilgan. Tadqiqot natijalari gidrometallurgik texnologiyalar metallurgiya sanoatini ekologik barqaror rivojlantirishda muhim ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar

Gidrometallurgiya; mis sanoati; ekologik xavfsizlik; bioeritmalash; bioleaching; pirometallurgiya; metallurgiya; chiqindilar; energiya samaradorligi; yashil texnologiyalar; mis rudalari; solvent ekstraksiya; elektroliz; ekologik barqarorlik.

Kirish

Hydrometallurgy zamonaviy metallurgiya sanoatining eng istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Ayniqsa, mis ishlab chiqarish sanoatida gidrometallurgik usullarning qo‘llanilishi ekologik xavfsizlikni ta’minlash, energiya sarfini kamaytirish va past tarkibli rudalarni samarali qayta ishlash imkoniyatlarini kengaytirishi bilan alohida ahamiyat kasb etmoqda. An’anaviy pirometallurgik usullar yuqori harorat talab qilishi, katta miqdorda atmosfera chiqindilarini hosil qilishi hamda atrof-muhitga salbiy ta’sir ko‘rsatishi sababli ekologik jihatdan jiddiy muammolarni yuzaga keltiradi [1]. Shu sababli, bugungi kunda ko‘plab davlatlarda ekologik barqaror va energiya tejamkor texnologiyalarni ishlab chiqish va amaliyotga joriy etish dolzarb masalalardan biri hisoblanmoqda. Mis sanoati global

iqtisodiyotning muhim tarmoqlaridan biri bo‘lib, elektrotexnika, mashinasozlik, energetika va qurilish sohalarida keng qo‘llaniladi. Jahon bozorida misga bo‘lgan talabning ortib borishi yangi konlarni o‘zlashtirish va mavjud rudalarni samarali qayta ishlash texnologiyalarini takomillashtirishni talab etmoqda [2]. Shu nuqtai nazardan, gidrometallurgik texnologiyalar kam tarkibli va murakkab tarkibli rudalardan mis ajratib olishda yuqori samaradorlikka ega ekanligi bilan ajralib turadi. Bu usullar eritmaga o‘tkazish, ekstraksiya va elektroliz kabi jarayonlarni o‘z ichiga oladi hamda yuqori haroratli pechlardan foydalanishni keskin kamaytiradi [3].

Gidrometallurgik jarayonlarning asosiy ekologik afzalliklaridan biri atmosferaga chiqariladigan zararli gazlar, ayniqsa oltingugurt dioksidi miqdorining sezilarli darajada kamayishidir. Pirometallurgik ishlab chiqarishda katta hajmdagi SO_2 gazi hosil bo‘lib, bu atmosfera ifloslanishi va kislotali yomg‘irlarning shakllanishiga sabab bo‘ladi [4]. Gidrometallurgik usullarda esa asosiy texnologik operatsiyalar suvli eritmalarda amalga oshirilgani sababli gazsimon chiqindilar ancha kam hosil bo‘ladi. Bundan tashqari, mazkur texnologiyalar energiya sarfini kamaytirish orqali issiqxona gazlari emissiyasining qisqarishiga ham xizmat qiladi [5]. So‘nggi yillarda bio-gidrometallurgiya va mikroorganizmlar yordamida metall ajratib olish texnologiyalariga qiziqish ortib bormoqda. Bakterial eritmalash usullari ekologik xavfsizligi va iqtisodiy samaradorligi bilan ajralib turadi hamda past tarkibli rudalarni qayta ishlashda katta istiqbolga ega [6]. Ayniqsa, Bioleaching texnologiyasi chiqindilarni kamaytirish va tabiiy resurslardan kompleks foydalanish imkoniyatini yaratadi.

Biroq gidrometallurgik texnologiyalarning ayrim cheklovlari ham mavjud. Eritmalarda ishlatiladigan kimyoviy reagentlar, chiqindi eritmalarni zararsizlantirish muammolari hamda suv resurslaridan foydalanish hajmi ekologik nazoratni talab qiladi [7]. Shu sababli zamonaviy ilmiy tadqiqotlar gidrometallurgik jarayonlarning ekologik xavfsizligini yanada oshirish, reagentlarni regeneratsiya qilish va yopiq suv aylanish tizimlarini joriy etishga qaratilgan. Mazkur maqolaning maqsadi mis ishlab chiqarish sanoatida qo‘llanilayotgan gidrometallurgik jarayonlarning ekologik afzalliklari va istiqbollarini ilmiy jihatdan tahlil qilish, ularning an’anaviy texnologiyalarga nisbatan ustun tomonlarini aniqlash hamda zamonaviy innovatsion yondashuvlarning sanoatdagi ahamiyatini baholashdan iboratdir. Tadqiqot davomida gidrometallurgik texnologiyalarning ekologik samaradorligi, iqtisodiy imkoniyatlari va kelajakdagi rivojlanish tendensiyalari yoritiladi.

Materiallar va metodlar

Mazkur tadqiqotda mis ishlab chiqarish sanoatida qo‘llanilayotgan Hydrometallurgy jarayonlarining ekologik afzalliklari va istiqbollari tahlil qilindi. Tadqiqotning asosiy metodologik bazasini ilmiy adabiyotlar tahlili, zamonaviy texnologik jarayonlarni solishtirish, statistik ma’lumotlarni o‘rganish hamda ekologik samaradorlik ko‘rsatkichlarini baholash tashkil etdi. Tadqiqot davomida gidrometallurgik va pirometallurgik texnologiyalar o‘rtasidagi asosiy farqlar ekologik xavfsizlik, energiya sarfi, chiqindilar miqdori va iqtisodiy samaradorlik nuqtai nazaridan o‘rganildi [1]. Ilmiy tadqiqotlar va sanoat ma’lumotlarini yig‘ish jarayonida xalqaro metallurgiya tashkilotlari, ekologik monitoring hisobotlari hamda gidrometallurgiya bo‘yicha chop etilgan ilmiy maqolalar asosiy manba sifatida foydalanildi. Tadqiqotda mis rudalarini qayta ishlashda keng qo‘llaniladigan eritmaga o‘tkazish (leaching), solvent ekstraksiya va elektroliz texnologiyalarining ekologik samaradorligi baholandi [2]. Shu bilan birga, bio-gidrometallurgik usullar, xususan Bioleaching texnologiyasining istiqbollari alohida tahlil qilindi. Tadqiqot obyekti sifatida sulfidli va oksidli mis rudalarini qayta ishlash jarayonlari tanlab olindi. Jarayonlarning ekologik samaradorligini aniqlashda atmosferaga chiqariladigan zararli gazlar miqdori, suv resurslaridan foydalanish ko‘rsatkichlari, chiqindi hajmi va energiya sarfi kabi mezonlardan foydalanildi [3]. Pirometallurgik texnologiyalar bilan taqqoslaganda gidrometallurgik jarayonlarda

karbonat angidrid va oltingugurt dioksidi emissiyasining kamayish darajasi statistik ma'lumotlar asosida baholandi.

Shuningdek, tadqiqot davomida gidrometallurgik texnologiyalarda qo'llaniladigan reagentlarning atrof-muhitga ta'siri ham o'rganildi. Eritmalarda ishlatiladigan sulfat kislota, ammiakli eritmalar va boshqa kimyoviy moddalarning chiqindi suv tarkibiga ta'siri ekologik monitoring natijalari orqali tahlil qilindi [4]. Suv resurslarini tejash maqsadida yopiq suv aylanish tizimlarining samaradorligi va sanoat korxonalarida ularni qo'llash imkoniyatlari ham ko'rib chiqildi. Tadqiqotning statistik qismida turli mamlakatlarda mis ishlab chiqarishda gidrometallurgik texnologiyalarning qo'llanilish ulushi va ekologik samaradorlik ko'rsatkichlari o'rganildi. Xususan, Chile, China va Kazakhstan misolida gidrometallurgik texnologiyalarning sanoatdagi o'rni va ekologik natijalari tahlil qilindi [5]. Olingan ma'lumotlar jadval va solishtirma tahlillar yordamida umumlashtirildi. Bundan tashqari, innovatsion texnologiyalar, jumladan avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari, chiqindilarni qayta ishlash usullari va energiya tejamkor elektroliz texnologiyalarining istiqbollari ham tadqiqot doirasida ko'rib chiqildi [6]. Zamonaviy gidrometallurgik usullarning ekologik xavfsizligini oshirish maqsadida ishlab chiqilayotgan "yashil texnologiyalar" va qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalash imkoniyatlari ilmiy nuqtai nazardan baholandi.

Natijalar

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, Hydrometallurgy mis ishlab chiqarish sanoatida ekologik xavfsizlikni ta'minlash va ishlab chiqarish samaradorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega. Gidrometallurgik texnologiyalarni an'anaviy pirometallurgik usullar bilan solishtirish jarayonida energiya sarfi, atmosferaga chiqariladigan zararli gazlar miqdori va chiqindi hosil bo'lish ko'rsatkichlarida sezilarli farqlar aniqlandi. Ayniqsa, past tarkibli mis rudalarini qayta ishlashda gidrometallurgik usullar iqtisodiy va ekologik jihatdan yuqori samaradorlikka ega ekanligi kuzatildi [1]. Tahlillar natijasida pirometallurgik ishlab chiqarish jarayonida atmosferaga katta hajmda oltingugurt dioksidi va karbonat angidrid chiqarilishi aniqlangan bo'lsa, gidrometallurgik texnologiyalarda bu ko'rsatkichlar ancha past darajada qayd etildi [2]. Bu esa atmosfera ifloslanishini kamaytirish hamda issiqxona gazlari emissiyasini nazorat qilishda gidrometallurgik texnologiyalarning muhim ekologik afzalliklarini ko'rsatadi. Shu bilan birga, gidrometallurgik jarayonlarda energiya sarfining kamayishi ishlab chiqarish tannarxining pasayishiga ham olib kelishi aniqlandi.

Bio-gidrometallurgik texnologiyalar bo'yicha o'tkazilgan tahlillar mikroorganizmlar yordamida misni eritmaga o'tkazish usuli ekologik jihatdan eng istiqbolli yo'nalishlardan biri ekanligini ko'rsatdi [3]. Xususan, Bioleaching jarayonida yuqori harorat talab qilinmasligi va chiqindilar miqdorining kamligi texnologiyaning ekologik samaradorligini oshiradi. Biroq bioeritmalash jarayoni nisbatan uzoq vaqt talab qilishi va mikroorganizmlar faoliyatining tashqi muhit omillariga bog'liqligi uning ayrim cheklovlari sifatida qayd etildi. Tadqiqot davomida turli mamlakatlarda gidrometallurgik texnologiyalarning qo'llanilish ko'rsatkichlari ham tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, Chile va China kabi davlatlarda gidrometallurgik usullarning ulushi yil sayin ortib bormoqda [4]. Bu holat ekologik standartlarning kuchayishi va energiya tejamkor texnologiyalarga bo'lgan ehtiyojning oshishi bilan izohlanadi.Bundan tashqari, yopiq suv aylanish tizimlarining joriy etilishi gidrometallurgik ishlab chiqarishda suv sarfini sezilarli darajada kamaytirishi aniqlandi. Oqartirish va eritmaga o'tkazish jarayonlarida reagentlarni qayta regeneratsiya qilish texnologiyalari chiqindilar hajmini kamaytirib, ekologik xavfsizlikni oshirishga xizmat qilmoqda [5]. Shu sababli zamonaviy metallurgiya korxonalarida "yashil texnologiyalar" asosida ishlab chiqarishni tashkil etish istiqbolli yo'nalish sifatida baholanmoqda.

Jadval 1

Mis ishlab chiqarishda gidrometallurgik va pirometallurgik jarayonlarning ekologik ko‘rsatkichlari

Ko‘rsatkichlar	Gidrometallurgik usul	Pirometallurgik usul
Energiya sarfi	Past	Yuqori
SO_2 emissiyasi	Juda kam	Juda yuqori
CO_2 chiqindisi	Kam	Yuqori
Suvdan foydalanish	Nazorat qilinadi	O‘rtacha
Past tarkibli rudalarni qayta ishlash	Samarali	Kam samarali
Chiqindi miqdori	Kam	Ko‘p
Jarayon harorati	Past harorat	Yuqori harorat
Ekologik xavfsizlik	Yuqori	Past
Reagentlardan foydalanish	Kimyoviy eritmalar	Yo‘qilg‘i va flyuslar
Qayta ishlash istiqbollari	Yuqori	Cheklangan

Natijalar asosida shuni ta’kidlash mumkinki, gidrometallurgik texnologiyalar mis ishlab chiqarish sanoatida ekologik xavfsizlikni oshirish, energiya sarfini kamaytirish va kam tarkibli rudalarni samarali qayta ishlash imkonini beradi. Shu bilan birga, innovatsion bio-gidrometallurgik texnologiyalarni rivojlantirish kelajakda metallurgiya sanoatining ekologik barqarorligini ta’minlashda muhim omillardan biri bo‘lishi mumkin.

Muhokama

Tadqiqot natijalari Hydrometallurgy texnologiyalarining mis ishlab chiqarish sanoatida ekologik va iqtisodiy jihatdan katta ustunliklarga ega ekanligini ko‘rsatdi. Ayniqsa, an’anaviy pirometallurgik usullar bilan taqqoslanganda gidrometallurgik jarayonlarning atmosferaga zararli gazlar chiqarilishini sezilarli darajada kamaytirishi zamonaviy ekologik talablar nuqtai nazaridan muhim ahamiyat kasb etadi [1]. Pirometallurgik ishlab chiqarishda katta miqdorda hosil bo‘ladigan oltingugurt dioksidi va karbonat angidrid gazlari atmosfera ifloslanishining asosiy manbalaridan biri hisoblanadi. Gidrometallurgik texnologiyalarda esa texnologik operatsiyalar suvli eritmalarda amalga oshirilgani sababli gazsimon chiqindilar miqdori ancha kamayadi. Bu holat ekologik xavfsizlikni ta’minlash hamda “yashil metallurgiya” tamoyillarini rivojlantirishda muhim omil bo‘lib xizmat qiladi [2]. Muhokama natijalari shuni ko‘rsatdiki, gidrometallurgik usullar past tarkibli rudalarni qayta ishlashda ayniqsa samarali hisoblanadi. An’anaviy pech texnologiyalarida iqtisodiy jihatdan samarasiz bo‘lgan rudalar gidrometallurgik usullar yordamida qayta ishlanishi mumkin [3]. Bu esa tabiiy resurslardan kompleks foydalanish imkonini kengaytiradi hamda sanoat chiqindilarini kamaytirishga xizmat qiladi. Shu bilan birga, past haroratli texnologik jarayonlardan foydalanish energiya sarfini kamaytirib, ishlab chiqarish tannarxining pasayishiga olib keladi.

Tahlillar davomida Bioleaching texnologiyasi ekologik jihatdan eng istiqbolli yo‘nalishlardan biri sifatida baholandi. Mikroorganizmlar yordamida sulfidli rudalardan metall ajratib olish usuli yuqori harorat talab qilmaydi va zararli gazlar hosil bo‘lishini deyarli bartaraf etadi [4]. Bundan tashqari, bioeritmalash texnologiyasi ishlab chiqarish chiqindilarini kamaytirish va energiya resurslarini tejash imkonini beradi. Biroq ushbu texnologiyaning ayrim cheklovlari ham mavjud bo‘lib, jarayonning sekin kechishi va mikroorganizmlar faoliyatining tashqi muhit omillariga bog‘liqligi sanoat miqyosida

qo‘llashda muayyan muammolarni yuzaga keltiradi [5]. Muhokama davomida gidrometallurgik texnologiyalarning ayrim ekologik xavflari ham qayd etildi. Eritmaga o‘tkazish jarayonlarida ishlatiladigan sulfat kislota va boshqa reagentlar noto‘g‘ri boshqarilganda tuproq va suv resurslariga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin [6]. Shu sababli chiqindi eritmalarni neytrallash, reagentlarni regeneratsiya qilish va yopiq suv aylanish tizimlarini joriy etish zamonaviy metallurgiya korxonalari uchun muhim talab hisoblanadi. Tadqiqot natijalari yopiq texnologik sikllarning joriy etilishi suv sarfini kamaytirish va ekologik xavfsizlikni oshirishga xizmat qilishini ko‘rsatdi.

Jahon tajribasi tahlili shuni ko‘rsatadiki, Chile, China hamda Kazakhstan kabi davlatlarda gidrometallurgik texnologiyalarni keng joriy etish ekologik standartlarning kuchayishi bilan bog‘liq holda jadallashmoqda [7]. Bu mamlakatlarda zamonaviy solvent ekstraksiya va elektroliz texnologiyalarining qo‘llanilishi yuqori tozalikka ega mis olish bilan birga ishlab chiqarish chiqindilarini kamaytirishga ham imkon bermoqda. Shuningdek, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish gidrometallurgik texnologiyalarning istiqbollarini yanada kengaytiradi. Quyosh va shamol energiyasi bilan integratsiyalashgan elektroliz tizimlari energiya sarfini kamaytirish va karbonat angidrid emissiyasini qisqartirish imkonini beradi [8]. Bu esa global ekologik muammolar, xususan iqlim o‘zgarishi sharoitida metallurgiya sanoatini barqaror rivojlantirishda muhim ahamiyat kasb etadi. Umuman olganda, tadqiqot natijalari gidrometallurgik texnologiyalar mis sanoatida ekologik xavfsizlikni ta’minlash, energiya tejamkorligini oshirish va tabiiy resurslardan samarali foydalanishda muhim o‘rin tutishini tasdiqladi. Kelgusida bio-gidrometallurgiya, avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari va chiqindisiz texnologiyalarni rivojlantirish metallurgiya sanoatining ekologik barqarorligini ta’minlashda asosiy yo‘nalishlardan biri bo‘lib qoladi.

Xulosa

Tadqiqot natijalari Hydrometallurgy mis ishlab chiqarish sanoatida ekologik va iqtisodiy jihatdan istiqbolli texnologik yo‘nalish ekanligini tasdiqladi. Gidrometallurgik jarayonlarning asosiy afzalligi an’anaviy pirometallurgik usullarga nisbatan atmosferaga chiqariladigan zararli gazlar miqdorining sezilarli darajada kamayishi, energiya sarfining pastligi va past tarkibli rudalarni samarali qayta ishlash imkoniyati bilan izohlanadi. Ayniqsa, oltingugurt dioksidi va karbonat angidrid emissiyasining kamayishi ekologik xavfsizlikni ta’minlash hamda iqlim o‘zgarishiga salbiy ta’sirni kamaytirishda muhim omil hisoblanadi. Tahlillar gidrometallurgik texnologiyalar zamonaviy metallurgiya sanoatida resurslardan kompleks foydalanish va chiqindilarni kamaytirish imkonini berishini ko‘rsatdi. Eritmaga o‘tkazish, solvent ekstraksiya va elektroliz jarayonlari yuqori darajada toza mis olish bilan birga ishlab chiqarish samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Shu bilan birga, Bioleaching texnologiyasi ekologik jihatdan eng istiqbolli yo‘nalishlardan biri sifatida baholandi. Mikroorganizmlar yordamida metall ajratib olish usuli energiya tejamkorligi, chiqindilarning kamligi va past tarkibli rudalarni qayta ishlashdagi samaradorligi bilan ajralib turadi. Biroq gidrometallurgik texnologiyalarning ayrim muammolari ham mavjud. Jarayonlarda ishlatiladigan kimyoviy reagentlarning atrof-muhitga ta’siri, chiqindi eritmalarni zararsizlantirish va suv resurslaridan samarali foydalanish masalalari doimiy ekologik nazoratni talab qiladi. Shu sababli yopiq suv aylanish tizimlari, reagentlarni regeneratsiya qilish hamda chiqindisiz texnologiyalarni joriy etish muhim ahamiyatga ega. Shuningdek, qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalashgan gidrometallurgik tizimlarning rivojlanishi kelajakda metallurgiya sanoatining ekologik barqarorligini yanada oshirishi mumkin. Zamonaviy “yashil texnologiyalar” asosida ishlab chiqarishni tashkil etish global ekologik muammolarni kamaytirish va sanoatning barqaror rivojlanishini ta’minlashda muhim rol o‘ynaydi. Umuman olganda, gidrometallurgik texnologiyalar mis ishlab chiqarish sanoatida ekologik xavfsizlik, energiya samaradorligi va iqtisodiy barqarorlikni ta’minlovchi

istiqbolli yo‘nalish sifatida baholanadi. Kelgusida bio-gidrometallurgiya, avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari va innovatsion ekologik texnologiyalarni rivojlantirish ushbu sohaning yanada takomillashishiga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Biswas A.K., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Copper*. Oxford: Pergamon Press, 2014.
2. Marsden J., House I. *The Chemistry of Gold Extraction*. 2nd ed. Colorado: SME Publications, 2018.
3. Rawlings D.E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories*. 2005;4(13):1–15.
4. Watling H.R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — A review. *Hydrometallurgy*. 2006;84(1–2):81–108.
5. Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., Robinson T.G., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*. Oxford: Elsevier, 2011.
6. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Copper*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2022.
7. Anderson C.G., Twidwell L.G. Hydrometallurgical processing and environmental sustainability in copper production. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019;5(3):215–228.
8. Petersen J. Bioleaching of copper sulfide minerals using mesophilic microorganisms. *Biotechnology Advances*. 2016;34(5):363–372.
9. Dreisinger D. Copper leaching and solvent extraction technology. *Hydrometallurgy*. 2015;157:15–25.
10. Zhao H., Li J., Chen S. Environmental impacts of copper production and strategies for cleaner metallurgy. *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:124–138.
11. Wang X., Liu Y. Advances in green hydrometallurgical technologies for copper recovery. *Minerals Engineering*. 2021;169:106–119.
12. Qin W., Yang C. Modern trends in hydrometallurgical extraction of non-ferrous metals. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018;28(4):721–734.