

ISSN: 3093-9305

VOLUME - 4

JOURNAL OF GLOBAL SCIENTIFIC INNOVATIONS





OLMALIQ KMK MIS SHLAKLARINI PIRIT BILAN SULFIDLAB MIS DAN TOZALASH: TERMODINAMIK VA GIDRODINAMIK TAHLIL

Nuraliyev Oybek Ulug'bek o'g'li^{1,*}, Matkarimov Soxibjon Turdaliyevich¹,
Akramov O'ral Akram o'g'li¹

¹Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, "Metallurgiya" kafedrası,
Universitet ko'chasi 2, Toshkent 100095, O'zbekiston

*Muallif bilan aloqa: Nuraliyev O.U., e-mail: oybeknuraliyev1993@gmail.com

Nuraliyev O.U. – PhD, ORCID: 0000-0003-2818-6241; Matkarimov S.T. – professor, ORCID:
0000-0003-2393-6576; Akramov O'.A. – Scopus Author ID: 57224307007

Annotatsiya. Maqolada "Olmaliq KMK" AJ mis eritish shlaklarini shlak tozalovchi elektr pechda pirit (FeS_2) qo'shib misdan tozalash jarayonining termodinamik va gidrodinamik asoslari o'rganilgan. Tadqiqot maqsadi – shlakda erigan va mexanik ilashib qolgan misni ajratib olish shartlarini aniqlash hamda pirit sarfining maqbul miqdorini asoslash. Ulix yaqinlashuvida Cu_2O ning FeS bilan sulfidlanishi, piritning dissotsiatsiyasi, magnetitning FeS va uglerod bilan qaytarilishi reaksiyalari uchun Gibbs energiyalari hisoblangan. $1250\text{ }^\circ\text{C}$ da $\text{Cu}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$ reaksiyasining muvozanat konstantasi $2,1 \cdot 10^4$ ga teng, ya'ni erigan mis deyarli to'liq sulfid shaklga o'tadi; FeS magnetitni $896\text{--}958\text{ }^\circ\text{C}$ dan yuqori haroratda qaytaradi. Shteyn tomchilarining cho'kish Stoks qonuni va tomchilar o'lchamining log-normal taqsimoti asosida, qattiq magnetitning qovushqoqlikka ta'siri esa Roscoe tenglamasi bilan modellashirilgan hamda 1 t shlak uchun moddiy balans tuzilgan. Natijalar misning shlakdagi yo'qotilishini kimyoviy emas, asosan gidrodinamik omillar – tomchilar o'lchami va shlak qovushqoqligi belgilashini ko'rsatdi. $d_{50} = 100\text{ }\mu\text{m}$, $\mu = 0,3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ va 4 soat tindirishda shlakdagi mis 0,90 % dan 0,41 % gacha kamayadi. Maqbul pirit sarfi 1 t shlakka 10–12 kg deb baholangan. Tozalangan shlak keyingi bosqichda temirni ajratib olish uchun qulay xomashyo hisoblanadi.

Kalit so'zlar: mis shlaki, shlakni tozalash, pirit, sulfidlash, shteyn, magnetit, Stoks qonuni, Olmaliq KMK.

ОБЕДНЕНИЕ МЕДНЫХ ШЛАКОВ АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГМК» СУЛЬФИДИРОВАНИЕМ ПИРИТОМ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Нуралиев О.У., Маткаримов С.Т., Акрамов У.А.

Аннотация. В статье рассмотрены термодинамические и гидродинамические основы обеднения медеплавильных шлаков АО «Алмалыкский ГМК» в электропечи с



добавкой пирита (FeS_2). Цель исследования – установить условия извлечения растворённой и механически увлечённой меди из шлака и обосновать оптимальный расход пирита. В первом приближении Улиха рассчитаны энергии Гиббса реакций сульфидирования Cu_2O сульфидом железа, диссоциации пирита, восстановления магнетита сульфидом железа и углеродом. При 1250°C константа равновесия реакции $\text{Cu}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$ равна $2,1 \cdot 10^4$, т. е. растворённая медь практически полностью переходит в сульфидную форму; FeS восстанавливает магнетит при температурах выше $896\text{--}958^\circ\text{C}$. Осаждение капель штейна смоделировано по закону Стокса с логнормальным распределением размеров капель, влияние твёрдого магнетита на вязкость оценено по уравнению Роско; составлен материальный баланс на 1 т шлака. Показано, что потери меди определяются не химическими, а главным образом гидродинамическими факторами – размером капель и вязкостью шлака. При $d_{50} = 100$ мкм, $\mu = 0,3$ Па·с и отстаивании в течение 4 ч содержание меди в шлаке снижается с 0,90 до 0,41 %. Оптимальный расход пирита оценён в 10–12 кг на 1 т шлака. Обеднённый шлак является более подходящим сырьём для последующего извлечения железа.

Ключевые слова: медный шлак, обеднение шлака, пирит, сульфидирование, штейн, магнетит, закон Стокса, Алмалыкский ГМК.

CLEANING OF ALMALYK MMC COPPER SLAGS BY PYRITE SULPHIDATION: THERMODYNAMIC AND HYDRODYNAMIC ANALYSIS

Nuraliyev O.U., Matkarimov S.T., Akramov U.A.

Abstract. The thermodynamic and hydrodynamic fundamentals of cleaning copper smelting slags of Almalyk MMC JSC in a slag-cleaning electric furnace with pyrite (FeS_2) addition are examined. The aim of the study is to establish the conditions for recovering dissolved and mechanically entrained copper from the slag and to justify the optimum pyrite addition. Gibbs energies were calculated in the first Ulich approximation for the sulphidation of Cu_2O by FeS , the dissociation of pyrite, and the reduction of magnetite by FeS and by carbon. At 1250°C the equilibrium constant of the reaction $\text{Cu}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$ is $2.1 \cdot 10^4$, so the dissolved copper is almost completely converted to the sulphide form, while FeS reduces magnetite above $896\text{--}958^\circ\text{C}$. Matte settling was modelled using Stokes' law with a log-normal droplet size distribution, the effect of solid magnetite on viscosity was estimated with the Roscoe equation, and a mass balance per tonne of slag was compiled. The results show that copper losses are governed not by chemical but mainly by hydrodynamic factors, namely droplet size and slag viscosity. With $d_{50} = 100$ μm , $\mu = 0.3$ Pa·s and 4 h of settling, the copper content of the slag decreases from 0.90 to 0.41 %. The



optimum pyrite addition is estimated at 10–12 kg per tonne of slag. The cleaned slag is a more suitable feedstock for subsequent iron recovery.

Keywords: copper slag, slag cleaning, pyrite, sulphidation, matte, magnetite, Stokes' law, Almalyk MMC.

KIRISH

Mis eritish shlaklari bilan yo'qotiladigan mis metallurgiyasidagi asosiy yo'qotishlardan biridir. Shlakdagi mis ikki shaklda bo'ladi: mexanik ilashib qolgan shteyn tomchilari ($\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}$) va shlakda erigan mis oksidi (Cu_2O) [1, 2]. Birinchi shaklni tomchilarni cho'ktirish, ikkinchisini esa sulfid yoki metall holiga o'tkazish orqali ajratib olish mumkin. Sanoatda buning uchun shlakni tozalovchi elektr pechlar ishlatiladi; ularga qaytaruvchi (koks) yoki sulfidlovchi (pirit, shteyn) qo'shimchalar kiritiladi [2, 3].

So'nggi yillardagi tadqiqotlar bu jarayonning asosiy omillarini aniqlab berdi. Li va hammualliflar [4] shlakni koks va pirit bilan birgalikda qaytaruvchi-sulfidlovchi eritishda tozalangan shlakdagi mis miqdorini o'rtacha 0,18 % gacha kamaytirishga erishgan, biroq bu natija yuqori pirit sarfi va 1350 °C haroratda olingan. Zhang va hammualliflar [5] shteyn zarrachalarining shlakda cho'kishi ularning birlashib yiriklashishi bilan kechishini, tindirish vaqti va harorat oshgani sari shteynning ajralishi yaxshilanishini, qaytaruvchi ortiqcha bo'lganda esa Fe–Cu qotishmasi hosil bo'lib, mis yo'qotilishi ortishini ko'rsatgan. Sanoat tindirgichini CFD usulida modellash natijalariga ko'ra, shlak qovushqoqligini uchdan bir qismga kamaytirish mis yo'qotilishini taxminan 37 % ga qisqartiradi [6]; CFD-DEM hisoblari esa tomchilarning to'qnashib birlashishi cho'kish tezligini sezilarli oshirishini tasdiqlagan [7]. Ammo bu ishlar boshqa tarkibdagi shlaklar uchun bajarilgan bo'lib, Olmaliq KMK shlaklari uchun termodinamik va gidrodinamik omillarni birgalikda baholovchi tahlil bizga ma'lum manbalarda uchramaydi.

Mis shlaklarini qayta ishlash va ulardan qimmatli metallarni ajratib olish dunyo miqyosida dolzarb vazifa hisoblanadi [8]. Olmaliq KMK mis eritish zavodida



ko'p yillik faoliyat davomida 7 mln t dan ortiq chiqindi shlak to'plangan; ularning bir qismi flotatsiya usulida qayta ishlanib, mis, oltin va kumush ajratib olinmoqda, temirni olish uchun esa past haroratli qaytarish va keyingi magnit separatsiyasi eng maqbul usul sifatida baholangan [9]. Korxona sharoitida texnogen chiqindilarni mis ishlab chiqarishga jalb qilish orqali shlaklardagi mis miqdorini kamaytirish imkoniyati sanoat sinovlarida ko'rsatilgan [10, 11]. Temirni qaytarishdan oldin misni ajratib olish ikki afzallik beradi: qo'shimcha mis olinadi va temir qotishmasining mis bilan ifloslanishi kamayadi. Pirit O'zbekiston mis-porfir konlari rudalarida keng tarqalgan va flotatsiyada alohida pirit konsentrati sifatida olinishi mumkin, shuning uchun u arzon sulfidlovchi hisoblanadi.

Tadqiqot maqsadi – pirit bilan shlakni tozalash jarayonining termodinamik asoslarini aniqlash, shteyn tomchilarining cho'kish kinetikasini modellashtirish, magnetit va qovushqoqlikning rolini baholash hamda moddiy balans asosida maqbul pirit sarfini topish. Ish hisob-nazariy xarakterga ega.

MATERIALLAR VA USULLAR

Shlak tarkibi. Hisoblar uchun Olmaliq KMK mis eritish shlakining quyidagi namunaviy tarkibi qabul qilindi: FeO – 41,44 %, Fe₃O₄ – 8,00 %, SiO₂ – 33,00 %, CaO – 3,50 %, Al₂O₃ – 4,50 %, MgO – 1,50 %, ZnO – 2,00 %, Cu₂S – 0,75 %, Cu₂O – 0,34 %, boshqalar – 4,97 %. Umumiy mis 0,90 %, uning 0,60 % i shteyn tomchilarida, 0,30 % i erigan Cu₂O holida.

Termodinamik hisob. Reaksiyalarning Gibbs energiyasi 298 K dagi ma'lumotnoma qiymatlari [12, 13] asosida Ulixning birinchi yaqinlashuvida (1) ifoda bo'yicha hisoblandi (1-jadval):

$$\Delta G^{\circ}_T \approx \Delta H^{\circ}_{298} - T \cdot \Delta S^{\circ}_{298}, \quad K_T = \exp(-\Delta G^{\circ}_T / RT). \quad (1)$$



1-jadval. Hisoblarda foydalanilgan termodinamik ma'lumotlar (298 K) [12, 13]

Modda	ΔH°_f , kJ/mol	S° , J/(mol·K)	Modda	ΔH°_f , kJ/mol	S° , J/(mol·K)
Cu ₂ O	-168,6	93,1	Fe ₃ O ₄	-1118,4	146,4
Cu ₂ S	-79,5	120,9	FeO	-272,0	60,75
FeS	-100,0	60,3	Fe ₂ SiO ₄	-1479,9	145,2
FeS ₂	-178,2	52,9	SiO ₂	-910,7	41,5
S ₂ (g)	128,6	228,2	SO ₂	-296,8	248,2
CO	-110,5	197,7	Cu	0	33,2
C (grafit)	0	5,74	—	—	—

Cho'kish modeli. Shteyn tomchisining shlakdagi cho'kish tezligi Stoks qonuni bo'yicha hisoblandi:

$$v = g \cdot d^2 \cdot \Delta \rho / (18 \cdot \mu), \quad (2)$$

bu yerda d – tomchi diametri, m; $\Delta \rho = \rho_{\text{sht}} - \rho_{\text{shl}} \approx 1500 \text{ kg/m}^3$ [1, 2]; μ – shlakning dinamik qovushqoqligi, Pa·s. Balandligi $H = 0,8 \text{ m}$ bo'lgan qatlamda t vaqt ichida to'liq cho'kadigan tomchining kritik diametri va ideal tindirgich uchun ajralish darajasi (3) va (4) ifodalar bilan aniqlandi:

$$d_{\text{kr}} = [18 \cdot \mu \cdot H / (g \cdot \Delta \rho \cdot t)]^{1/2}, \quad \varepsilon(d) = \min[1; (d/d_{\text{kr}})^2], \quad (3)$$

$$E = \sum w_i \cdot \varepsilon(d_i), \quad (4)$$

bu yerda w_i – tomchilarning massa ulushi. Tomchilar o'lchami log-normal taqsimotga bo'ysunadi deb olindi ($d_{50} = 50\text{--}200 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_g = 2,5$). Qattiq magnetit zarrachalarining qovushqoqlikka ta'siri Roscoe tenglamasi [14] bilan baholandi:

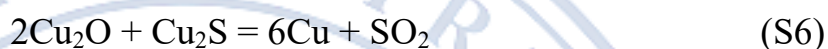
$$\mu = \mu_0 \cdot (1 - 1,35 \cdot \varphi)^{-2,5}, \quad (5)$$

bu yerda $\mu_0 = 0,25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ – suyuq shlak qovushqoqligi; φ – qattiq magnetitning hajmiy ulushi (1250 °C da magnetitning shlakda eruvchanligi 4 % deb qabul qilindi). Hisoblar Python 3 (NumPy, SciPy, Matplotlib) muhitida bajarildi; jarayon harorati 1250 °C (1523 K).



NATIJALAR

Reaksiyalar termodinamikasi. Ko'rib chiqilgan reaksiyalar:

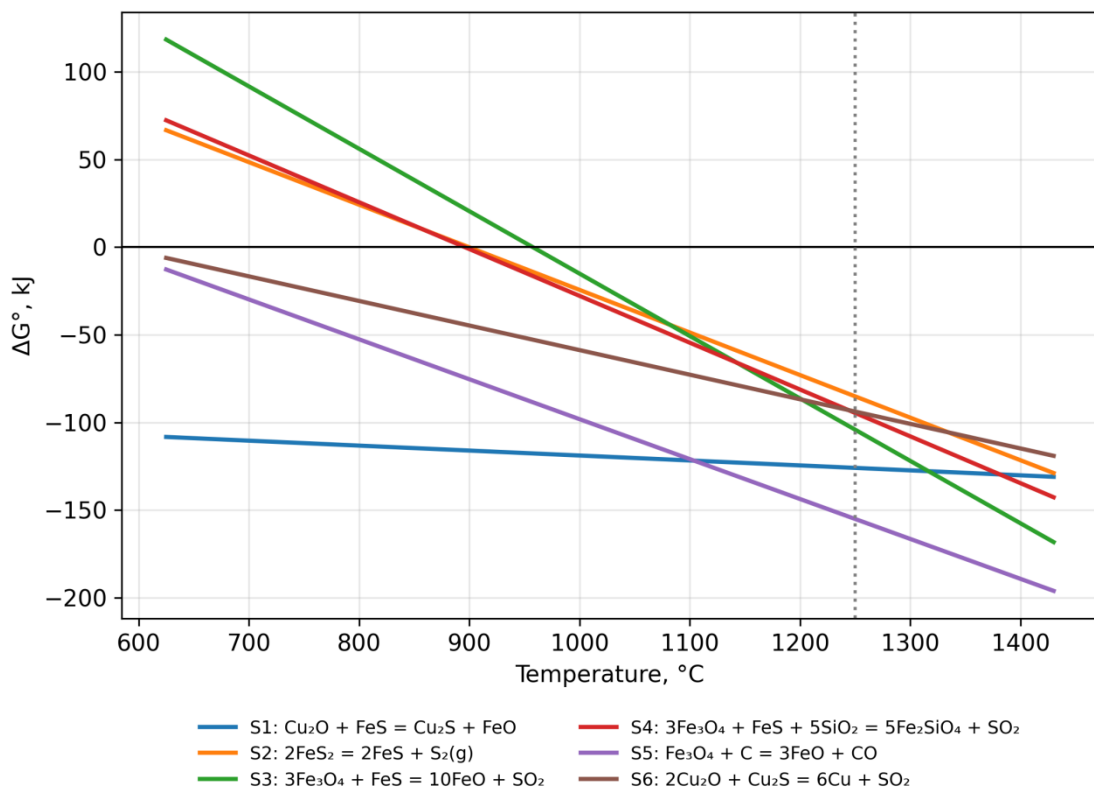


S1–S6 reaksiyalarning (1) ifoda bo'yicha hisoblangan ko'rsatkichlari 2-jadvalda, ΔG° ning haroratga bog'liqligi 1-rasmda keltirilgan.

2-jadval. Reaksiyalarning termodinamik ko'rsatkichlari

Reaksiya	ΔH° , kJ	ΔS° , J/K	ΔG°_{298} , kJ	ΔG°_{1523} , kJ	T_0 , °C
S1	–82,9	28,3	–91,3	–125,9	–
S2	285,0	243,0	212,5	–85,1	900
S3	438,4	356,2	332,2	–104,1	958
S4	312,4	267,2	232,7	–94,6	896
S5	191,9	227,8	124,0	–155,1	569
S6	119,9	140,3	78,1	–93,8	581

Izoh: “–” – ΔG° barcha haroratlarda manfiy; $T_0 - \Delta G^\circ = 0$ bo'ladigan harorat.



1-rasm. Sulfidlash va qaytarish reaksiyalari standart Gibbs energiyasining haroratga bog‘liqligi (punktir – 1250 °C)

2-jadval va 1-rasmdan quyidagilar kelib chiqadi. Cu_2O ning FeS bilan sulfidlanishi (S1) barcha haroratlarda qulay, 1250 °C da $K = 2,1 \cdot 10^4$. $a_{\text{FeO}} = 0,4$ va shunday $a_{\text{FeS}} = 0,5$ bo‘lganda muvozanatdagi $a_{\text{Cu}_2\text{O}}/a_{\text{Cu}_2\text{S}}$ nisbati $3,8 \cdot 10^{-5}$ ni tashkil etadi, ya’ni erigan mis amalida to‘liq Cu_2S ga o‘tadi. Pirit 900 °C dan yuqorida FeS va S_2 bug‘iga parchalanadi (S2), shuning uchun suyuq shlakka kiritilganda u tezda faol FeS manbaiga aylanadi.

Magnetitning FeS bilan qaytarilishi (S3) 958 °C dan, SiO_2 ishtirokida (S4) esa 896 °C dan boshlab qulay bo‘ladi. Demak, pirit ikki vazifani bajaradi: misni sulfidlaydi va magnetitni qaytarib, shlak qovushqoqligini kamaytiradi. Koks bilan qaytarish (S5) ham termodinamik jihatdan qulay, lekin u metall misni hosil qilmaydi va temirni ham qaytarib yuborish xavfini tug‘diradi; ortiqcha qaytaruvchi Fe–Cu qotishmasi hosil qilib, mis yo‘qotilishini oshirishi tajribada ham kuzatilgan [5]. S6

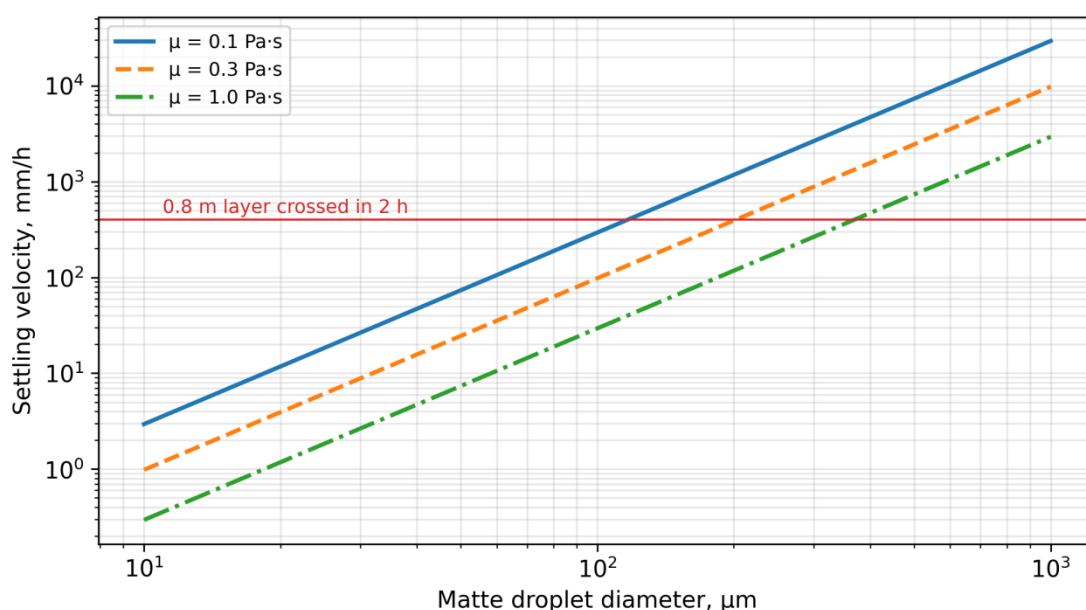


reaksiyasi 581 °C dan yuqorida mumkin, ammo shlakdagi Cu_2O ning past faolligida uning hissasi kichik.

Shteyn tomchilarining cho‘kishi. (2) ifoda bo‘yicha turli o‘lchamdagi tomchilarning 0,8 m qatlamni o‘tish vaqti 3-jadval va 2-rasmda keltirilgan.

3-jadval. Shteyn tomchilarining 0,8 m shlak qatlamidan cho‘kish vaqti, soat

d, μm	$\mu = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$\mu = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$\mu = 1,0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
10	271,8	815,5	2718,3
20	68,0	203,9	679,6
50	10,9	32,6	108,7
100	2,7	8,2	27,2
200	0,68	2,0	6,8
500	0,11	0,33	1,1



2-rasm. Shteyn tomchilarining cho‘kish tezligi (Stoks qonuni)

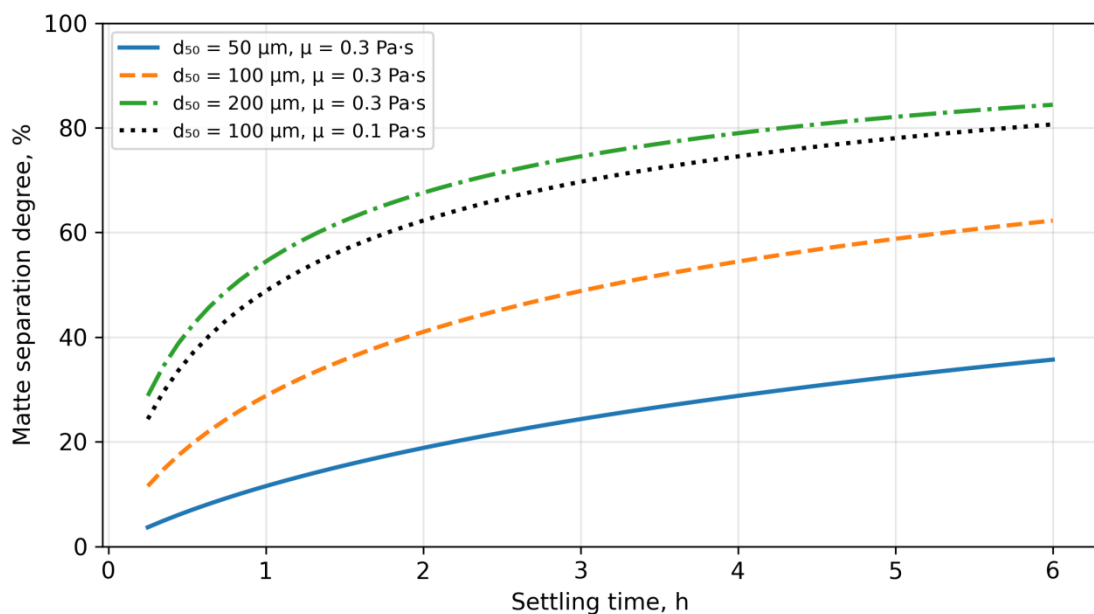
Natijalar shuni ko‘rsatadiki, 50 μm dan kichik tomchilar sanoat tindirish vaqtida (2–4 soat) amalda cho‘kmaydi: $\mu = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ da 50 μm tomchi uchun 33 soat, 20 μm tomchi uchun esa 200 soatdan ortiq vaqt kerak. 200 μm dan yirik tomchilar esa bir necha soatda to‘liq cho‘kadi. Tomchilar o‘lchami taqsimotini hisobga olgan



holda (3)–(4) ifodalar bo‘yicha hisoblangan umumiy ajralish darajasi 4-jadval va 3-rasmda keltirilgan.

4-jadval. Shteynning ajralish darajasi, % ($\mu = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)

$d_{50}, \mu\text{m}$	1 soat	2 soat	4 soat	6 soat
50	11,5	18,8	28,8	35,7
100	28,8	41,0	54,4	62,3
150	43,2	56,7	69,7	76,4
200	54,4	67,6	79,0	84,4



3-rasm. Shteyn ajralish darajasining tindirish vaqti, tomchilar o‘lchami va qovushqoqlikka bog‘liqligi

Ajralish darajasiga tomchilar o‘lchami tindirish vaqtidan kuchliroq ta’sir qiladi. d_{50} ni $50 \mu\text{m}$ dan $200 \mu\text{m}$ gacha oshirish 4 soatda ajralishni 29 % dan 79 % gacha ko‘taradi, tindirishni 2 soatdan 6 soatga uzaytirish esa $100 \mu\text{m}$ uchun uni faqat 41 % dan 62 % gacha oshiradi. Qovushqoqlikni 0,3 dan 0,1 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ gacha kamaytirish ham kuchli ta’sir ko‘rsatadi: $d_{50} = 100 \mu\text{m}$ va 4 soatda ajralish 54 % dan 75 % gacha ortadi (3-rasm).



Magnetitning qovushqoqlikka ta'siri. (5) ifoda bo'yicha hisob natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval. Magnetit miqdorining shlak qovushqoqligiga ta'siri (Roscoe tenglamasi, 1250 °C)

Fe_3O_4 , %	Qattiq faza ulushi φ	μ , Pa·s	μ/μ_0
4	0,000	0,250	1,00
6	0,014	0,262	1,05
8	0,028	0,275	1,10
10	0,042	0,290	1,16
15	0,079	0,332	1,33
20	0,117	0,384	1,54

Qattiq magnetit zarrachalarining gidrodinamik ta'siri Roscoe modeli bo'yicha nisbatan mo'tadil: magnetit 8 % dan 20 % gacha oshganda qovushqoqlik 1,1 dan 1,5 martagacha ortadi. Biroq amalda magnetit, shuningdek, shlak–shteyn chegarasida qattiq qatlam hosil qilib, tomchilarning birlashishiga to'sqinlik qiladi [2, 3]. Shu sababli magnetitni FeS bilan qaytarish (S3–S4) ham qovushqoqlik, ham fazalar ajralishi nuqtai nazaridan foydali.

Moddiy balans. 1 t shlak uchun balans quyidagi farazlar bilan hisoblandi: pirit to'liq FeS va S_2 ga parchalanadi; FeS avval Cu_2O ni sulfidlaydi, so'ng magnetitning 50 % ini qaytaradi; qolgan FeS Cu_2S bilan shteyn hosil qiladi; tomchilar ajralishi $d_{50} = 100 \mu\text{m}$, $\mu = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 4 soat uchun hisoblandi. Pirit sarfi



quyida asoslangan maqbul qiymatga (10 kg/t) teng qabul qilindi. Natijalar 6-jadvalda keltirilgan.

6-jadval. 1 t shlakni 10 kg pirit bilan tozalashning moddiy balansi

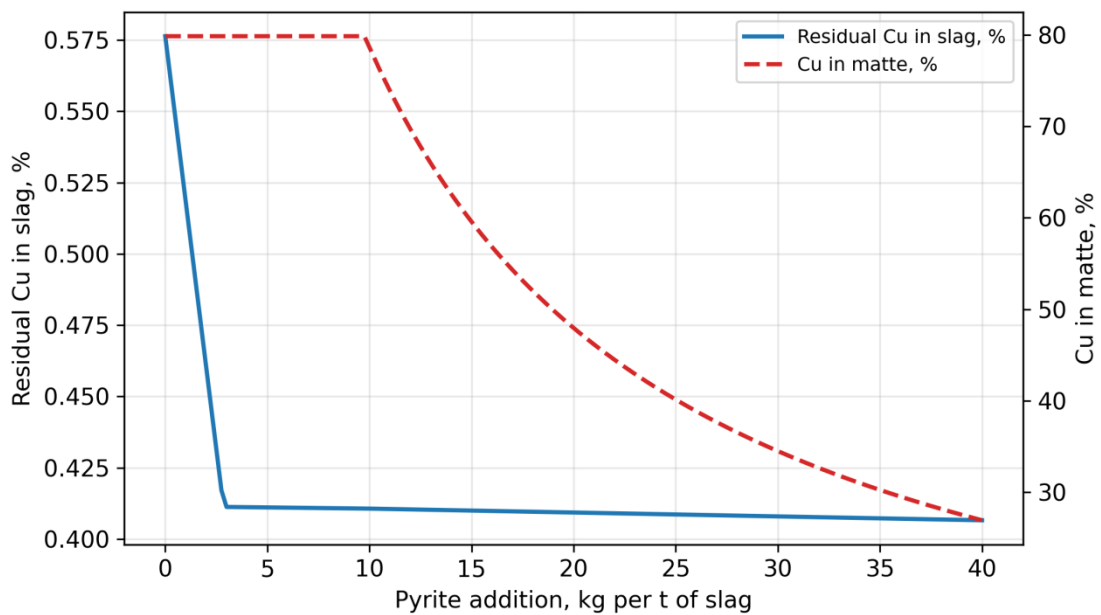
Kirish	kg	Chiqish	kg
Shlak	1000,0	Tozalangan shlak (cho'kmagan shteyn bilan)	997,40
Pirit (FeS_2)	10,0	Cho'kkan shteyn	6,24
		S_2 bug'i (SO_2 ga yondiriladi)	2,67
		SO_2 (magnetit qaytarilishidan)	3,69
Jami	1010,0	Jami	1010,0

Balans yopiladi. Hosil bo'lgan shteyn massasi 11,5 kg, undagi mis 78,6 %. Shteynning 54,4 % i cho'kadi va 4,90 kg mis ajratib olinadi; tozalangan shlakda 0,41 % mis qoladi.

Pirit sarfining ta'siri. Pirit sarfi o'zgarganda natijalar 7-jadval va 4-rasmda keltirilgan.

7-jadval. Pirit sarfining shteyn va qoldiq misga ta'siri (1 t shlakka)

Pirit, kg	Shteyn, kg	Shteyndagi Cu, %	Qoldiq Cu, %
0	7,5	79,9	0,576
3	11,3	79,9	0,411
10	11,5	78,6	0,411
12	12,9	69,7	0,410
20	18,8	48,0	0,409
30	26,1	34,5	0,408
40	33,4	26,9	0,407



4-rasm. Pirit sarfining shlakdagi qoldiq mis va shteyn tarkibiga ta'siri ($d_{50} = 100 \mu\text{m}$, $\mu = 0,3$ Pa·s, 4 soat)

Piritsiz holatda erigan Cu_2O shlakda qoladi va qoldiq mis 0,58 % ni tashkil etadi. Cu_2O ni sulfidlash uchun stexiometrik pirit miqdori atigi 2,9 kg/t bo'lgani sababli qoldiq mis taxminan 3 kg/t sarfdayoq 0,41 % gacha tushadi (4-rasm). Piritning keyingi qismi magnetitni qaytarishga sarflanadi: Cu_2O ni to'liq sulfidlash va magnetitning yarmini qaytarish uchun stexiometrik talab 9,8 kg/t ni tashkil etadi. Modelda qovushqoqlik o'zgaras ($0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) deb olinganligi sababli magnetit qaytarilishining foydasi qoldiq mis qiymatida aks etmaydi, ammo u qovushqoqlikni kamaytiradi va fazalar ajralishini yaxshilaydi (5-jadval). Pirit sarfini 12 kg/t dan oshirish qoldiq misni deyarli kamaytirmaydi, lekin shteyndagi mis miqdorini 70 % dan 27 % gacha pasaytiradi va keyingi konvertorlashda ortiqcha yuk hosil qiladi. Demak, maqbul sarf 10–12 kg/t atrofida.

MUHOKAMA

Termodinamik tahlil shlakdagi erigan misni sulfidlash muammo emasligini ko'rsatadi. Misning asosiy yo'qotilishi mayda shteyn tomchilari bilan bog'liq bo'lib, uni kimyoviy emas, gidrodinamik omillar belgilaydi. Bu xulosa qovushqoqlik pasayganda mis yo'qotilishi sezilarli kamayishini ko'rsatgan CFD modellashirish



natijalari [6] bilan mos keladi. Shuning uchun shlakni tozalash texnologiyasida uchta yo'nalish muhim: qovushqoqlikni kamaytirish (magnetitni qaytarish, haroratni ko'tarish), tomchilarni yiriklashtirish (koalessensiya) va tindirish vaqtini ta'minlash.

Piritning koalessensiyaga ta'siri modelda hisobga olinmagan, ammo amaliyotda muhim bo'lishi mumkin: pirit parchalanganda hosil bo'ladigan yangi FeS fazasi va S₂ pufakchalari shlak hajmida harakatlanib, mayda tomchilarni to'playdi [2, 3]. Tomchilarning birlashib yiriklashishi cho'kishni tezlashtirishi tajribada [5] va CFD-DEM modellashtirishda [7] ham qayd etilgan. Elektr pechdagi elektr-konvektiv aralashtirish ham shunday ta'sir ko'rsatadi. Bu mexanizmlar d₅₀ ni oshiradi va 4-jadvaldagi eng yaxshi ssenariyga yaqinlashtiradi. Ularni miqdoriy baholash uchun tajriba ma'lumotlari kerak.

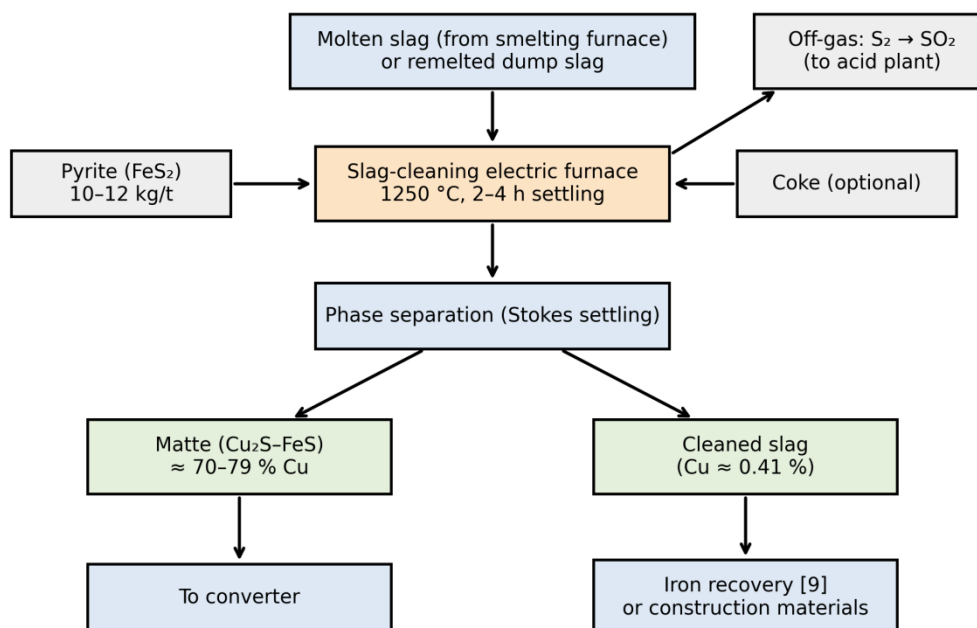
Olingan natijani adabiyotdagi ma'lumotlar bilan solishtirish mumkin: qaytaruvchi-sulfidlovchi eritishda 1350 °C va yuqori pirit sarfida qoldiq mis 0,18 % gacha kamaygan [4]. Bizning hisobimizdagi 0,41 % qiymat pastroq harorat (1250 °C), kam pirit sarfi va koalessensiya hisobga olinmagan konservativ cho'kish modeliga mos keladi, ya'ni amaldagi natija bundan yaxshiroq bo'lishi kutiladi.

Tozalangan shlak temir ajratib olish uchun qulayroq xomashyo bo'ladi: undagi mis kamroq, magnetit qisman qaytarilgan. Shu sababli taklif etilayotgan jarayon temirni past haroratli qaytarish va magnit separatsiyasi orqali ajratib olish [9] bosqichidan oldingi bosqich sifatida qaralishi mumkin.

Tadqiqot cheklavlari. Termodinamik hisoblar Ulix yaqinlashuvida va standart holat uchun bajarilgan. Cho'kish modeli tomchilar koalessensiyasini, konveksiyani va tomchilarning shlak–shteyn chegarasida ushlanib qolishini hisobga olmaydi. Moddiy balans modelida qovushqoqlikning pirit sarfiga bog'liqligi hisobga olinmagan. Tomchilar o'lchami taqsimoti, magnetitning eruvchanligi va shlak qovushqoqligi faraz qilingan qiymatlar bo'lib, ular tajribada aniqlanishi kerak.



Natijalar asosida shlakni tozalash sxemasi taklif etildi (5-rasm).



5-rasm. Mis shlakini pirit bilan tozalashning taklif etilayotgan sxemasi

XULOSA

1. 1250 °C da $\text{Cu}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$ reaksiyasining muvozanat konstantasi $2,1 \cdot 10^4$ ga teng; shlakda erigan mis pirit qo‘shilganda amalda to‘liq sulfid shaklga o‘tadi. FeS, shuningdek, magnetitni 896–958 °C dan yuqorida qaytaradi.

2. Stoks qonuni bo‘yicha 50 μm dan kichik shteyn tomchilari 2–4 soatlik tindirishda cho‘kmaydi. Shlakdagi mis yo‘qotilishini asosan tomchilar o‘lchami va qovushqoqlik belgilaydi: d_{50} ni 50 dan 200 μm gacha oshirish 4 soatda ajralishni 29 % dan 79 % gacha ko‘taradi.

3. $d_{50} = 100 \mu\text{m}$, $\mu = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ va 4 soat tindirishda shlakdagi mis 0,90 % dan 0,41 % gacha kamayadi. Maqbul pirit sarfi 10–12 kg/t bo‘lib, bunda shteyndagi mis 70–79 % ni tashkil etadi.



4. Tozalash bosqichini shlakdan temirni qaytarib olishdan oldin qo‘llash ham misni qo‘shimcha ajratib olish, ham temir mahsulotining mis bilan ifloslanishini kamaytirish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1] M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, and W. G. Davenport, *Extractive Metallurgy of Copper*, 5th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2011.
- [2] A. V. Vanyukov and V. Ya. Zaitsev, *Shlaki i shteiny tsvetnoi metallurgii* [Slags and Mattes of Non-Ferrous Metallurgy]. Moscow, USSR: Metallurgiya, 1969 (in Russian).
- [3] B. Gorai, R. K. Jana, and Premchand, “Characteristics and utilisation of copper slag – a review,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, no. 4, pp. 299–313, 2003.
- [4] Y. Li, S. H. Yang, C. B. Tang, Y. M. Chen, J. He, and M. T. Tang, “Reductive-sulfurizing smelting treatment of smelter slag for copper and cobalt recovery,” *J. Min. Metall. Sect. B-Metall.*, vol. 54, no. 1, pp. 73–79, 2018, doi: 10.2298/JMMB160315049L.
- [5] H. Zhang, B. Li, Y. Wei, and H. Wang, “The settling behavior of matte particles in copper slag and the new technology of copper slag cleaning,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 6216–6230, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.061.
- [6] A. Schmidt, V. Montenegro, and G. D. Wehinger, “Transient CFD modeling of matte settling behavior and coalescence in an industrial copper flash smelting furnace settler,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 52, no. 1, pp. 405–413, 2021, doi: 10.1007/s11663-020-02026-0.
- [7] J.-P. Jylhä and A. Jokilaakso, “CFD-DEM models for matte droplet settling in a flash smelting settler,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Art. no. e21570, 2023.
- [8] P. Sarfo, A. Das, G. Wyss, and C. Young, “Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag,” *Waste Manag.*, vol. 70, pp. 272–281, 2017.
- [9] A. Khasanov, T. Sirozhov, Sh. Utkirova, and M. Murtozaeva, “Hydrometallurgical and flotation methods of slag depletion,” *Universum: Tekhnicheskie Nauki*, no. 5(98), pp. 56–58, 2022.
- [10] Sh. Mukhamedzhanova, O. Nuraliyev, Zh. Ismailov, B. Karimzhonov, and Q. Ochildiyeu, “Improvement of the technology of copper production by involving in the processing of industrial waste JSC “Almalyk MMC” in Uzbekistan,” in *XV Int. Sci. Conf. “INTERAGROMASH 2022”: Global Precision Ag Innovation 2022*, vol. 2, A. Beskopylny,



- M. Shamtsyan, and V. Artiukh, Eds., *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 575. Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 2193–2199.
- [11] S. Mukhamedzhanova and S. Matkarimov, “Development of resource-saving technology for copper production at “Almalyk MMC” JSC,” *E3S Web Conf.*, vol. 525, Art. no. 04001, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202452504001.
- [12] D. R. Lide, Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [13] R. A. Robie and B. S. Hemingway, “Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 pascals) pressure and at higher temperatures,” U.S. Geol. Surv., Washington, DC, USA, Bull. 2131, 1995.
- [14] R. Roscoe, “The viscosity of suspensions of rigid spheres,” *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 3, no. 8, pp. 267–269, 1952.

