(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

UO‘K: 669.2.046

10.70769/3030-3214.SRT.4.4.2026.3

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

VANYUKOV PECHI TOSHQOLLARIDA MISNING YO‘QOTILISH SHAKLLARI VA SHTEYN TOMCHILARINING CHO‘KISH SHAROITLARINI FIZIK-KIMYOVIY BAHOLASH



Kurbanov Bunyod Tulkinovich

Qarshi davlat texnika universiteti mustaqil tadqiqotchisi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: bunedkurbanov09@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-9835-7671
Science ID: MTV-1026-0384



Xasanov Ulug‘bek Abdirashidovich

PhD, “Olmaliq KMK” AJ atrof-muhitni muhofaza qilish bo‘limi ekologik menejment tizimi bo‘yicha I toifali muhandisi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: u.hasanov@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0007-8363-9422
Science ID: FTV-1225-0015

Annotatsiya. *Maqolada Vanyukov pechi toshqollari bilan misning yo‘qotilish shakllari 2018–2026 yillarda e’lon qilingan eksperimental va sanoat ma’lumotlari asosida tahlil qilingan hamda shteyn tomchilarining toshqoldan cho‘kish sharoitlari hisoblab baholangan. Balxash zavodi Vanyukov pechi va shunga o‘xshash agregatlar toshqolida misning 75–90% i mexanik shaklda, ya’ni muallaq shteyn tomchilarida bo‘lishi ko‘rsatilgan, biroq kremnezyom, glinozyom va magnetitga boy “Olmaliq KMK” AJ toshqoliga bu nisbatni to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirib bo‘lmaydi. Erigan misning eng kam miqdori shteyndagi misning 65–70% iga to‘g‘ri keladi, Al_2O_3 va CaO qo‘shimchalari uni yanada kamaytiradi. Adamar–Ribchinskiy tuzatmasi kiritilgan Stoks tenglamasi asosida 0,5 m qalinlikdagi toshqol qatlamidan 2 soatda cho‘kib ulguradigan tomchining kritik diametri qovushqoqlik 0,25–1,0 Pa·s bo‘lganda 123–240 mkm ekani aniqlangan. Qattiq magnetit miqdori 15% gacha ortganda bu diametr yana taxminan 20% ga kattalashadi. Sanoat toshqollarida tomchilarning 90% i 15 mkm dan kichik bo‘lgani uchun ular 200 soatdan ortiq vaqtda ham cho‘kmaydi. Demak, “Olmaliq KMK” AJ Vanyukov pechi toshqolidagi misni kamaytirish uchun tindirish vaqtini uzaytirishdan ko‘ra magnetitni qaytarish, qovushqoqlikni pasaytirish va tomchilarni yiriklashtirish samaraliroq.*

Kalit so‘zlar: *Vanyukov pechi, toshqol, shteyn, erigan mis, mexanik yo‘qotishlar, Stoks tenglamasi, qovushqoqlik, magnetit, tomchilarning cho‘kishi.*

Received: 24.10.2026 | Accepted: 09.11.2026 | Issue publication: 28.12.2026

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФОРМ ПОТЕРЬ МЕДИ СО ШЛАКАМИ ПЕЧИ ВАНЮКОВА И УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ КАПЕЛЬ ШТЕЙНА

Курбанов Бунёд Тулкинович

Самостоятельный соискатель Каршинского государственного технического университета, Альмалык, Узбекистан

Хасанов Улугбек Абдирашидович

PhD, инженер I категории по системе экологического менеджмента отдела охраны окружающей среды АО «Алмалыкский ГМК», Алмалык, Узбекистан

Аннотация. *В статье на основе экспериментальных и промышленных данных, опубликованных в 2018–2026 гг., проанализированы формы потерь меди со шлаками печи Ванюкова и расчётом оценены условия осаждения капель штейна из шлака. Показано, что в шлаках печи Ванюкова Балхашского завода и аналогичных агрегатов 75–90% меди находится в механической форме, т.е. во взвешенных каплях штейна, однако на богатый кремнезёмом, глинозёмом и магнетитом шлак АО «Алмалыкский ГМК» это соотношение непосредственно переносить нельзя. Минимум растворённой меди соответствует содержанию меди в штейне 65–70%, добавки Al_2O_3 и CaO дополнительно снижают его. По уравнению Стокса с поправкой Адамара–Рыбчинского установлено, что критический диаметр капли, успевающей осесть через слой шлака толщиной 0,5 м за 2 ч, при вязкости 0,25–1,0 Па·с составляет 123–240 мкм. Рост содержания твёрдого магнетита до 15% увеличивает этот диаметр ещё примерно на 20%. Поскольку в промышленных шлаках 90% капель мельче 15 мкм, они не осаждаются и за 200 ч. Следовательно, для снижения содержания меди в шлаке печи Ванюкова АО «Алмалыкский ГМК» эффективнее восстанавливать магнетит, снижать вязкость и укрупнять капли, чем увеличивать время отстаивания.*

Ключевые слова: *печь Ванюкова, шлак, штейн, растворённая медь, механические потери, уравнение Стокса, вязкость, магнетит, осаждение капель.*

PHYSICOCHEMICAL ASSESSMENT OF THE FORMS OF COPPER LOSS IN VANYUKOV FURNACE SLAGS AND OF THE SETTLING CONDITIONS FOR MATTE DROPLETS

Kurbanov Bunyod Tulkinovich

Independent researcher, Karshi State Technical University, Almalyk, Uzbekistan

Khasanov Ulugbek Abdirashidovich

PhD, Engineer of the 1st category, Environmental Management System, Environmental Protection Department, JSC "Almalyk MMC", Almalyk, Uzbekistan

Abstract. *The forms of copper loss with Vanyukov furnace slags are analysed using experimental and industrial data published in 2018–2026, and the conditions for matte droplets to settle out of the slag are evaluated by calculation. In the slags of the Balkhash Vanyukov furnace and similar units, 75–90 % of the copper is present in mechanical form, i.e. in suspended matte droplets, but this ratio cannot be transferred directly to the slag of JSC "Almalyk MMC", which is rich in silica, alumina and magnetite. Dissolved copper is lowest at a matte grade of 65–70% Cu, and additions of Al_2O_3 and CaO reduce it further. The Stokes equation with the Hadamard–Rybczynski correction shows that the critical diameter of a droplet able to settle through a 0.5 m slag layer within 2 h is 123–240 µm at slag viscosities of 0.25–1.0 Pa·s. Raising the solid magnetite content to 15 % increases this diameter by a further 20% or so. Since 90 % of the droplets in industrial slags are smaller than 15 µm, they do not settle even in 200 h. Therefore, to lower the copper content of the Vanyukov furnace slag at JSC "Almalyk MMC", reducing magnetite, lowering viscosity and coarsening the droplets are more effective than extending the settling time.*

Keywords: *Vanyukov furnace, slag, matte, dissolved copper, mechanical losses, Stokes equation, viscosity, magnetite, droplet settling.*

Kirish. Vanyukov pechida sulfidli mis konsentratlarini suyuq vannada eritish yuqori solishtirma unumdorlik va gazlarning issiqligidan to‘liq foydalanish bilan ajralib turadi, ammo jadal barbotaj toshqolning shteyn tomchilari bilan ifloslanishiga ham sabab bo‘ladi. Hozirda bunday pechlar Norilsk, Balxash, O‘rta Ural zavodlari va “Olmaliq KMK” AJda ishlamoqda [1]. Kombinat mis eritish zavodining toshqolida 0,77–0,97% mis bor, magnetit miqdori 10–15% ga yetadi, mis esa asosan bornit va xalkozin ko‘rinishidagi sulfidlarda bo‘ladi [2]. Eritish rejimini takomillashtirish ag‘darma toshqoldagi misni 0,82% dan 0,45% gacha kamaytirishga imkon bergani [3] bu

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

ko‘rsatkich hali pastroq bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Toshqoldagi misni kamaytirish usulini to‘g‘ri tanlash uchun avval mis qanday shaklda yo‘qotilayotganini bilish kerak. Erigan mis faqat shteyn tarkibi va kislorod potensialini o‘zgartirish orqali kamayadi, mexanik yo‘qotishlar esa tomchilarning cho‘kish sharoitlari bilan belgilanadi. Ishning maqsadi so‘nggi yillardagi ma’lumotlar asosida Vanyukov pechi toshqolida misning yo‘qotilish shakllari nisbatini tahlil qilish va shteyn tomchilarining cho‘kishiga toshqol qovushqoqligi, magnetit miqdori va tindirish vaqti ta’sirini miqdoran baholashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Shteyn–toshqol muvozanatini termodinamik modellash-tirishda erigan mis va mexanik ilashib qolgan mis bir-biridan ajratib ko‘riladi, chunki elektron mikrozond tahlilida ular turli fazalarda qayd etiladi [4]. Ko‘pchilik sanoat toshqollarida mexanik shakl ustun turadi (1-jadval), ammo bu xulosa barcha pechlar uchun bir xil emas. Balxash zavodining Vanyukov pechi toshqolida misning 82,1% i sulfidlarda, 12,6% i ferritlarda, 4,8% i oksidlarda bo‘lgan [5]. Shu zavodda toshqol bilan yo‘qotilayotgan misning 75–80% i mexanik yo‘qotishlarga to‘g‘ri kelishi va erigan mis 0,41% atrofida ekani aniqlangan [6]. Xitoydagi SKS jarayonida erigan mis yo‘qotishlarning 10–20% ini tashkil etgan [7]. “Olmaliq KMK” AJning muallaq holatda eritish toshqolida esa mis deyarli faqat sulfid zarralarida bo‘lgani qayd etilgan [8]. Shu bilan birga, 1980-yillardagi tadqiqotlarda Vanyukov pechi toshqolida mexanik yo‘qotishlar umumiy yo‘qotishlarning 10% idan oshmaydi deb baholangan [9].

1-jadval

Mis eritish toshqollarida misning yo‘qotilish shakllari nisbati

Agregat, zavod	Toshqoldagi Cu, %	Erigan mis	Mexanik (sulfid) mis
Vanyukov pechi, Balxash	0,73–0,80	≈ 17 %	82 %
Vanyukov pechi, Balxash	2 gacha	≈ 0,41 % Cu	75–80 %
Kislorodli tubdan puflash pechi (SKS), Xitoy	–	10–20 %	80–90 %
Tindirgich pech (qaytarilgan toshqol), Shvetsiya	1,0–1,6	25–43 %	57–75 %
Muallaq holatda eritish, OKMK	–	deyarli yo‘q	asosiy qismi

Erigan misning miqdori shteyndagi mis miqdoriga bog‘liq. 1250 °C va pSO_2 = 0,25 atm sharoitida magnetit bilan to‘yingan toshqolda shteyndagi mis 61% dan 70% gacha ortganda toshqoldagi mis kamayib, undan keyin deyarli o‘zgarmagan [11]. Al_2O_3 va CaO qo‘shilgan toshqollarda bu miqdor 70 % dan kambag‘alroq shteynlarda yana ham past bo‘lgan. Shunga o‘xshash natija 1200 °C da ham olingan. Unda toshqoldagi mis shteyndagi misning 65–70% ida eng kam qiymatga ega bo‘lib, undan yuqorida yana ortgan [12]. Sanoat SKS pechida toshqoldagi mis shteyn 68 % dan boyiganda keskin oshgan [7].

Mexanik yo‘qotishlar toshqolning qovush-qoqligi va zichligi, tomchilarning o‘lchami bilan belgilanadi. Sanoat mis eritish toshqolining qovushqoqligi 1523 K da 0,45–0,78 Pa·s, zichligi 3600 kg/m^3 ni tashkil etgan. Undagi tomchilarning 38% i 5 mkm dan, 90% i 15 mkm dan kichik bo‘lgan [10]. Toshqolni hisoblashda shteyn zichligi 5100 kg/m^3, qovushqoqligi 0,04 Pa·s deb olinadi [13]. Fayalitli toshqol qovushqoqligi Fe_2O_3 miqdori taxminan 7% ga yetgach keskin ortadi [14]. FeO–Fe_2O_3–SiO_2–CaO–MgO–Al_2O_3 tizimida Fe_2O_3 12% dan 16% gacha ortganda qovushqoqlik 0,45 dan 1,04 Pa·s gacha oshgan [15]. Boy toshqollar uchun FeO/SiO_2=1,8 va CaO/SiO_2= 0,7 nisbatlarida qovushqoqlik 0,3–0,5 Pa·s bo‘lishi ko‘rsatilgan [16]. Shteyn tomchilari gaz pufakchalariga yopishib, toshqol yuzasiga ko‘tarilishi mumkin [17]. 650 mkm dan kichik SO_2 pufakchalari esa shteynni toshqolga olib chiqib, mexanik yo‘qotishlarni oshiradi [18].

Erigan misning shteyn tarkibiga bog‘liqligi [11] ishining jadval ma’lumotlari va Norilsk zavodidagi tajriba pechi natijalari [19] asosida tahlil qilindi. Shteyn tomchisining toshqoldagi cho‘kish tezligi suyuq tomchi uchun Adamar–Ribchinskiy tuzatmasi kiritilgan Stoks tenglamasi bilan hisoblandi:

$$v = \frac{2gr^2(\rho_{sh}-\rho_t)}{9\mu_t} \cdot \frac{3\mu_t+3\mu_{sh}}{2\mu_t+3\mu_{sh}}, \quad (1)$$

bu yerda v – cho‘kish tezligi, m/s; g – erkin tushish tezlanishi, m/s^2; r – tomchi radiusi, m; ρ_{sh} va ρ_t – shteyn va toshqol zichligi, kg/m^3; μ_t va μ_{sh} – toshqol va shteynning dinamik qovushqoqligi, Pa·s. H qalinlikdagi qatlamdan τ vaqtda cho‘kib ulguradigan eng kichik tomchi diametri, ya’ni kritik diametr (1) dan kelib chiqadi:

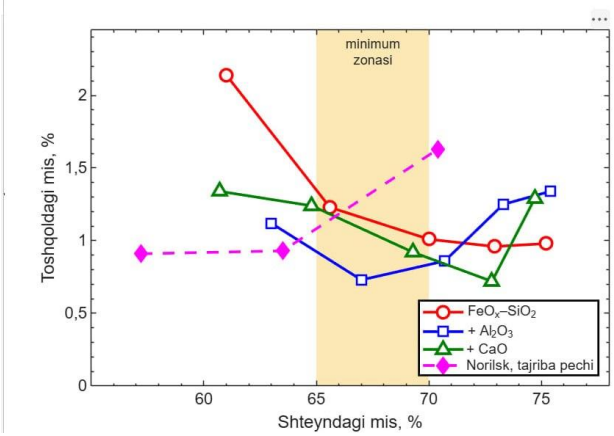
$$d_{\text{kr}} = \sqrt{\frac{18\mu_t H}{g\Delta\rho\tau k_{\text{AR}}}}, \qquad (2)$$

bu yerda $\Delta\rho = \rho_{sh} - \rho_t$; k_{AR} – (1) tenglamadagi Adamar–Ribchinskiy ko‘paytuvchisi. Qattiq magnetit zarralarining toshqol qovushqoqligiga ta’siri Roskoning qattiq sferalar suspenziyasi uchun tenglamasi bilan baholandi [20]:

$$\mu = \mu_0(1 - 1{,}35\varphi)^{-2{,}5}, \quad \varphi = \frac{w\rho_t}{100\rho_m}, \qquad (3)$$

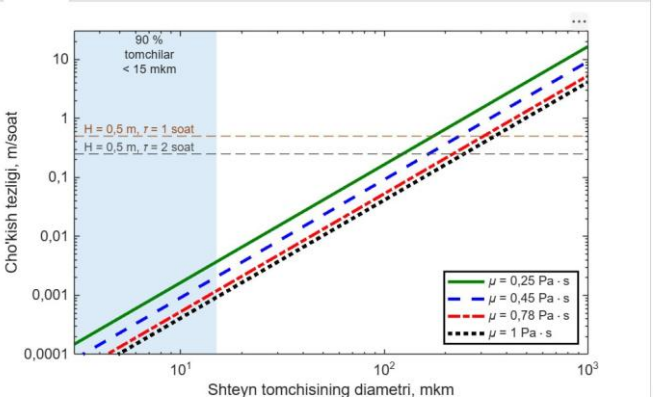
bu yerda μ_0 – suyuq toshqol qovushqoqligi, Pa·s; φ – qattiq magnetitning hajmiy ulushi; w – uning massaviy miqdori, %; ρ_m = 5170 kg/m^3 – magnetit zichligi. Hisoblarda ρ_t = 3600 kg/m^3, ρ_{sh} = 5100 kg/m^3, μ_{sh} = 0,04 Pa·s, H = 0,5 m qabul qilindi, toshqol qovushqoqligi 0,25–1,0 Pa·s oralig‘ida o‘zgartirildi [10, 13].

Natijalar. Toshqoldagi misning shteyn tarkibiga bog‘liqligi 1-rasmda keltirilgan. Toza FeO_x–SiO_2 toshqolida shteyndagi mis 61% dan 66% gacha ortganda toshqoldagi mis 2,14% dan 1,23% gacha kamayadi va 70–75% li shteynlarda 0,96–1,02% atrofida qoladi. Al_2O_3 qo‘shilgan toshqolda eng kam qiymat (0,73 %) 67% li, CaO qo‘shilganda (0,72%) 73% li shteynga to‘g‘ri keladi. Norilsk tajriba pechida esa toshqoldagi umumiy mis 57–64% li shteynlarda 0,91–0,93% ni tashkil etgan va 70% li shteynda 1,63% gacha oshgan [19]. Demak, sanoat sharoitida boy shteynga o‘tish magnetit hosil bo‘lishini kuchaytiradi va u orqali ham erigan, ham mexanik yo‘qotishlarni oshiradi.



1-rasm. Toshqoldagi misning shteyndagi mis miqdoriga bog‘liqligi (1250 °C, pSO2 = 0,25 atm, magnetit bilan to‘yingan toshqol [11]; Norilsk tajriba pechi – toshqoldagi umumiy mis [19]).

(1) tenglama bo‘yicha hisoblangan cho‘kish tezligi 2-rasmda keltirilgan. Shteynning qovushqoqligi toshqolnikidan o‘n barobardan ko‘proq past bo‘lgani uchun Adamar–Ribchinskiy ko‘paytuvchisi 1,40–1,47 ni tashkil etadi, ya’ni suyuq tomchi qattiq zarradan 40–47% tezroq cho‘kadi. 0,5 m qatlamdan 2 soatda cho‘kish uchun tomchi 0,25 m/soat tezlikka ega bo‘lishi kerak. Bu shart 0,25 Pa·s qovushqoqlikda 123 mkm dan, 1,0 Pa·s da esa 240 mkm dan yirik tomchilar uchungina bajariladi (2-jadval).

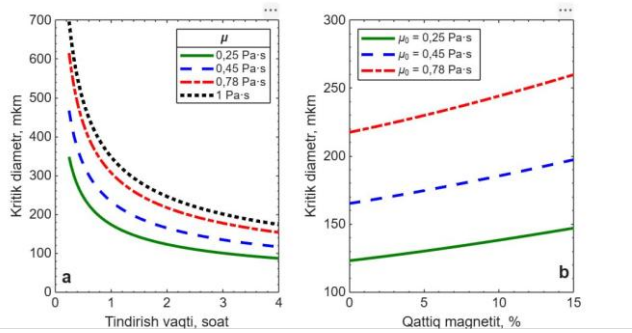


2-rasm. Shteyn tomchisining toshqoldagi cho‘kish tezligi.

2-jadval

Turli tindirish vaqti va toshqol qovushqoqligida tomchining kritik diametri, mkm (H=0,5 m)

μ_t, Pa·s	τ = 0,5 soat	τ = 1 soat	τ = 2 soat	τ = 4 soat
0,25	246	174	123	87
0,45	326	230	163	115
0,78	425	301	213	150
1,00	481	340	240	170



3-rasm. Kritik diametrning tindirish vaqtiga (a) va qattiq magnetit miqdoriga (b) bog‘liqligi (H=0,5 m; b rasmda τ = 2 soat).

Tindirish vaqtining ta’siri 3-rasm, a da ko‘rsatilgan. Vaqtni 1 soatdan 4 soatgacha, ya’ni to‘rt barobar uzaytirish kritik diametrni faqat ikki barobar kamaytiradi, chunki d_{kr} vaqtning kvadrat ildiziga teskari proporsional. Shu bilan birga tomchilarning 90% i 15 mkm dan kichik [10]. 0,45

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

Pa·s qovushqoqlikda 15 mkm li tomchi 0,5 m qatlamdan taxminan 236 soatda, 5 mkm li tomchi esa 2100 soatdan ortiq vaqtda cho‘kadi. O‘rta Ural zavodi toshqolida ham qo‘shimchalarning 70% dan ortig‘i 3 mkm dan kichik bo‘lgan [21]. Bunday tomchilarni tindirish yo‘li bilan ajratib bo‘lmaydi.

Magnetitning ta’siri 3-rasm, b da keltirilgan. Roskoning tenglamasi bo‘yicha 15% qattiq magnetit qovushqoqlikni 1,46 barobar oshiradi va kritik diametrni taxminan 20% ga kattalashtiradi.

Muhokama. Vanyukov pechlarida shteyndagi mis Balxash zavodida 53–55% [6], O‘rta Ural zavodida 45–50% [21] ni tashkil etadi, ya’ni 1-rasmdagi egri chiziqlar minimumidan chapda turadi. Bunday shteynlarda erigan mis 0,3% atrofida bo‘ladi [19]. “Olmaliq KMK” AJ pechi esa 60% atrofidagi shteyn bilan ishlaydi, uning toshqolida 35,9–36,3% SiO_2, 6,7–7,6% Al_2O_3 va 7,9–9,3% magnetit bor [22]. Magnetit erigan misni oshiradi, shuning uchun bu toshqolda erigan mis ulushi Balxash toshqolidagidan sezilarli yuqori bo‘lishi kutiladi. Demak, Balxash zavodi uchun olingan 75–82 % mexanik ulushni [5, 6] kombinat toshqoliga ko‘chirib bo‘lmaydi, undagi mis shakllari alohida baholanishi kerak. Ikkala holatda ham magnetitni kamaytirish erigan va mexanik yo‘qotishlarni bir vaqtda kamaytiradi.

Hisob natijalarini kombinat uchun e’lon qilingan ma’lumot bilan solishtirish mumkin. 200 mkm li shteyn tomchisi 50 sm qatlamdan 2,56 soatda cho‘kadi [3]. (1) tenglamaga ko‘ra bunday tezlik toshqol qovushqoqligi 0,6–0,85 Pa·s bo‘lganda olinadi, bu esa magnetitga boy toshqol uchun o‘lchangan qiymatlarga [10, 15] mos keladi.

Roskoning tenglamasi bo‘yicha olingan 20% li o‘sish minimal baho hisoblanadi, chunki tenglama alohida sferik zarralar uchun chiqarilgan. Magnetit kristallari esa zanjir va to‘rlar hosil qiladi, shuning uchun tajribada qovushqoqlik ancha keskin ortadi [14, 15]. Bundan tashqari magnetit toshqol–shteyn chegarasida qatlam hosil qilib, tomchilarning shteyn vannasi bilan qo‘shilishiga to‘sqinlik qiladi.

Olingan natijalardan Vanyukov pechi toshqolidagi misni kamaytirishning uchta yo‘nalishi kelib chiqadi. Birinchisi magnetitni qaytarish va flyuslash orqali qovushqoqlikni 0,3–0,5 Pa·s gacha pasaytirishdir. Bu kritik diametrni 1,5 barobargacha kamaytiradi. CaO miqdorini 7,7–18,3% gacha oshirish tindirgich pechda misni ajratib olishni 63% dan 88 % gacha ko‘targani [10] bu yo‘nalishning samarasini tasdiqlaydi. Ikkinchisi tomchilarni yiriklashtirishdir. Haroratni oshirish metall fazasi zarralarining birlashishini tezlashtiradi [23], sulfidizator qo‘shish esa toshqolda yangi shteyn fazasini hosil qilib, mayda tomchilarni yig‘ib oladi. Uchinchisi shteyn tarkibini erigan mis minimumiga yaqin, ya’ni 65–70% atrofida ushlab turishdir. Biroq magnetit hosil bo‘lishi kuchaymasligi uchun bu kislorod sarfi bilan birga boshqarilishi kerak.

Xulosa. So‘nggi yillardagi ma’lumotlar Balxash zavodi Vanyukov pechi va shunga o‘xshash agregatlar toshqolida misning 75–90% i shteyn tomchilari ko‘rinishidagi mexanik shaklda ekanini ko‘rsatadi. Kremnezyom, glinozyom va magnetitga boy “Olmaliq KMK” AJ toshqolida esa erigan mis ulushi yuqoriroq bo‘lishi kutiladi, shuning uchun bu nisbatni unga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirib bo‘lmaydi. Erigan misning minimumi shteyndagi misning 65–70% iga to‘g‘ri keladi, Al_2O_3 va CaO qo‘shimchalari uni kamaytiradi.

Adamar–Ribchinskiy tuzatmasi bilan Stoks tenglamasi bo‘yicha 0,5 m qatlamdan 2 soatda cho‘kadigan tomchining kritik diametri 0,25–1,0 Pa·s qovushqoqlikda 123–240 mkm ni tashkil etadi, qattiq magnetit esa uni yana taxminan 20% ga oshiradi. Sanoat toshqolidagi tomchilarning asosiy qismi 15 mkm dan kichik bo‘lgani uchun tindirish vaqtini uzaytirish kam samara beradi.

Toshqoldagi misni kamaytirish uchun magnetitni qaytarish, toshqolni CaO bilan flyuslab qovushqoqlikni 0,3–0,5 Pa·s gacha pasaytirish hamda tomchilarni sulfidlash va harorat orqali yiriklashtirish zarur.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1] Камкин, Р. И. (2011). Оптимизация технологии извлечения меди и сопутствующих элементов при барботажном восстановительном обеднении многокомпонентных шлаков [Автореферат диссертации кандидата технических наук]. НИТУ «МИСиС».

[2] НИТУ «МИСИС». (б. д.). Процесс плавки в жидкой ванне — печь Ванюкова. Извлечено 24 октября 2026 г. из misis.ru/business/innovations/blast

[3] Панфилов, В. П. (1989). Совершенствование шлакового режима печей Ванюкова [Диссертация кандидата технических наук]. МИСиС.

[4] Сайитов, С. С., Цой, В. Д., Расулов, Ш. М., Печерский, Р. Д., Расулова, А. В., Абдуваитов, А. К., & Асроров, А. А. (2024). Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 335(4), 148–158. https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4292

[5] Фомичёв, В. Б. (2003). Исследование и разработка технологии обеднения шлаков, содержащих никель, кобальт и медь, с использованием восстановительных газов [Автореферат диссертации кандидата технических наук]. СПбГПУ.

[6] Bogatyrev, D. M., Novozhilova, O. S., Tsymbulov, L. B., & Ozerov, S. S. (2024). Investigation of the effect of temperature conditions of the slag depletion process on the coalescence of metal phase particles. Tsvetnye Metally, (5), 27–32. https://doi.org/10.17580/tsm.2024.05.02

[7] Chen, M., Avarmaa, K., Taskinen, P., Michallik, R., & Jokilaakso, A. (2023). Investigation on the matte/slag/spinel/gas equilibria in the Cu-Fe-O-S-SiO_2-(CaO, Al_2O_3) system at 1250 °C and pSO_2 of 0.25 atm. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 44(4), 313–324. https://doi.org/10.1080/08827508.2022.2047966

[8] Cheng, X., Cui, Z., Contreras, L., Chen, M., Nguyen, A., & Zhao, B. (2019). Matte entrainment by SO_2 bubbles in copper smelting slag. JOM, 71(5), 1897–1903. https://doi.org/10.1007/s11837-019-03423-w

[9] Dosmukhamedov, N., Shambulayev, B., Dityatovskiy, L., Zholdasbay, Y., & Argyn, A. (2025). Determination of quantitative ratios (mechanical and dissolved) of copper, gold and silver losses in Vanyukov furnace slags under the conditions of the Balkhash copper smelter in Kazakhstan. Recycling, 10(5), Article 181. https://doi.org/10.3390/recycling10050181

[10] Fedorov, A. N., Dosmukhamedov, N. K., & Zholdasbay, E. E. (2019). Formation of liquid phases and viscosity of the Cu_2O–FeO_x–SiO_2–CaO–Al_2O_3 slag system saturated with copper oxide. Tsvetnye Metally, (1), 19–25. https://doi.org/10.17580/tsm.2019.01.03

[11] Ip, S. W., & Toguri, J. M. (1992). Entrainment behavior of copper and copper matte in copper smelting operations. Metallurgical Transactions B, 23(3), 303–311. https://doi.org/10.1007/BF02656285

[12] Isaksson, J., Andersson, A., Vikström, T., Lennartsson, A., & Samuelsson, C. (2023). Improved settling mechanisms of an industrial copper smelting slag by CaO modification. Journal of Sustainable Metallurgy, 9(3), 1378–1389. https://doi.org/10.1007/s40831-023-00733-x

[13] Jokilaakso, A., & Khan, N. (2018). Dynamic modelling of molten slag-matte interactions in an industrial flash smelting furnace settler. In Extraction 2018: Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy (pp. 993–1005). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_80

[14] Kurmangaliyev, D., & Abdulina, S. (2026). Physicochemical characteristics of copper smelting slags from Kazakhstan and their potential for secondary resource recovery. Processes, 14(1), Article 113. https://doi.org/10.3390/pr14010113

[15] Ochildiev, K. T., Mukhametdzhanova, Sh. A., Matkarimov, S. T., & Nosirkhudzhaev, S. K. (2025). Improving the technology of smelting sulfide copper concentrates in JSC Almalyk MMC. Tsvetnye Metally, (12). https://doi.org/10.17580/tsm.2025.12.04

[16] Roscoe, R. (1952). The viscosity of suspensions of rigid spheres. British Journal of Applied Physics, 3(8), 267–269. https://doi.org/10.1088/0508-3443/3/8/306

[17] Shishin, D., Jak, E., & Decterov, S. A. (2018). Thermodynamic assessment of slag–matte–metal equilibria in the Cu-Fe-O-S-Si system. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 39(5), 456–475. https://doi.org/10.1007/s11669-018-0661-0

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

[18] Sineva, S., Shishin, D., Shevchenko, M., Hayes, P. C., & Jak, E. (2023). Experimental study of the combined effects of Al_2O_3, CaO and MgO on gas/slag/matte/spinel equilibria in the Cu–Fe–O–S–Si–Al–Ca–Mg system at 1473 K (1200 °C) and $p(SO_2)$ = 0.25 atm. Journal of Sustainable Metallurgy, 9(2), 599–612. https://doi.org/10.1007/s40831-023-00677-2

[19] Starodub, K., Kuminova, Y., Dinsdale, A., Cheverikin, V., Filichkina, V., Saynazarov, A., Khvan, A., & Kondratiev, A. (2016). Experimental investigation and modeling of copper smelting slags. Metallurgical and Materials Transactions B, 47(5), 2904–2918. https://doi.org/10.1007/s11663-016-0761-3

[20] Viswanathan, N. N., Ji, F.-Z., Du, S., & Seetharaman, S. (2001). Viscosity measurements on some fayalite slags. ISIJ International, 41(7), 722–727. https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.722

[21] Wang, B., Yang, H., Jin, Z., Liu, Z., & Zou, M. (2022). Effect of Fe/SiO_2 ratio and Fe_2O_3 on the viscosity and slag structure of copper-smelting slags. Metals, 12(1), Article 24. https://doi.org/10.3390/met12010024

[22] Wang, Q.-M., Wang, S.-S., Tian, M., Tang, D.-X., Tian, Q.-H., & Guo, X.-Y. (2019). Relationship between copper content of slag and matte in the SKS copper smelting process. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 26(3), 301–308. https://doi.org/10.1007/s12613-019-1738-4

[23] Xasanov, U. A. (2021). Mis eritish pechlarida toshqol tarkibidagi mis miqdorini kamaytirishning asosiy omillarini ishlab chiqish [Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi]. Toshkent davlat texnika universiteti.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Kurbanov, B. T., & Xasanov, U. A. (2026). Vanyukov pechi toshqollarida misning yo‘qotilish shakllari va shteyn tomchilarining cho‘kish sharoitlarini fizik-kimyoviy baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(4). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.4.2026.3