DOI: 10.67889/2181-144X-2026-3-31-36

RUDANI MAYDALASH JARAYONIDA ELEKTR ENERGIYA SARFINI OPTIMALLASHTIRISH: MATEMATIK MODELLAR ASOSIDA ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH

Gulnara Djavliyeva [1][0000-0001-8694-5985] , **Mavjuda Boboraxmatova**[2]

[1]Termiz davlat universiteti, Pedagogika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
Algebra va geometriya kafedrasi katta o‘qituvchisi, E-mail: gdzavlieva@gmail.com
Termiz davlat unversiteti talabasi, E-mail: mavjudaboboraxmatova984@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada polimetall rudalarini qayta ishlash bosqichida elektr energiya sarfini kamaytirish va uskunalar unumdorligini oshirish masalalari matematik modellashtirish usullari yordamida tadqiq etilgan. Maydalash jarayonining energiya sarfi Bond qonuni, tegirmon quvvati balansi va tasmali uzatgichlarning harakat nazariyasi asosida modellashtirilgan. Chastota boshqaruvli elektr uzatmalar uchun quvvat tejash formulalari chiqarilgan. GST 42×118A tipidagi aylanuvchi saralagichni joriy etish natijasida yillik 25 920–38 880 kVt·soat elektr energiyasini tejish mumkinligi hisob-kitoblar bilan asoslangan. Optimallashtirish masalasi maqsad funksiyasi va cheklov tengsizliklari tizimi ko’rinishida qo’yilib, yechimi topilgan. Natijalar Surxondaryo viloyati Sariosiyo tumani «Xondiza» kon-boyitish kompleksining real ishlab chiqarish ma’lumotlari bilan tasdiqlangan.

Kalit so’zlar*:* polimetall ruda, maydalash, matematik model, Bond ish indeksi, energiya samaradorligi, chastota boshqaruvi, tasmali uzatgich, optimallashtirish, GST 42×118A.

Аннотация. В данной статье исследуются вопросы сокращения расхода электроэнергии и повышения производительности оборудования на этапе переработки полиметаллических руд методами математического моделирования. Энергопотребление процесса дробления смоделировано на основе закона Бонда, баланса мощности мельницы и теории движения ленточных конвейеров. Выведены формулы экономии мощности для частотно-регулируемых электроприводов. Расчётами обоснована возможность ежегодной экономии 25 920–38 880 кВт·ч при внедрении вращающегося грохота GST 42×118A. Задача оптимизации поставлена в виде целевой функции и системы ограничений.

Ключевые слова*:* полиметаллическая руда, дробление, математическая модель, индекс работы Бонда, энергоэффективность, частотное регулирование, ленточный конвейер, оптимизация.

Abstract. This article investigates the reduction of electricity consumption and the improvement of equipment productivity in the processing of polymetallic ores using mathematical modelling methods. The energy consumption of the crushing process is modelled on the basis of Bond’s law, mill power balance and belt conveyor dynamics. Power-saving formulas for variable-frequency drives are derived. Calculations substantiate the possibility of saving 25 920–38 880 kWh per year by introducing the GST 42×118A rotary screen. The optimization problem is formulated as an objective function with a system of constraints and solved for the «Khondiza» mining and processing complex (Surkhandarya region, Uzbekistan).

Keywords: polymetallic ore, crushing, mathematical model, Bond work index, energy efficiency, variable frequency drive, belt conveyor, optimization.

1. KIRISH

Tog’-kon va metallurgiya sanoatida elektr energiyasining 40–60 foizi maydalash va saralash jarayonlariga to’g’ri keladi [1–3]. Polimetall rudalarni qayta ishlashda energiya intensivligi qazib olingan ruda birligiga nisbatan eng yuqori ko’rsatkichlardan biridir, chunki foydali komponentlarni monomer ajralish darajasigacha yetkazish uchun bir necha maydalash bosqichidan o’tkazish talab etiladi [2]. Shu sababli maydalash liniyalarining

energiya samaradorligini oshirish masalasi nafaqat iqtisodiy, balki ekologik jihatdan ham dolzarbdir [3, 4].

Mavjud adabiyotlarda maydalash energiyasi asosan empirik formulalar orqali baholanadi [2, 5], ammo uskunalar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik, chastota boshqaruvining tejamkorlik mexanizmi va butun texnologik zanjir bo'yicha integral optimallashtirish masalasi yetarlicha yaxlit holda yoritilmagan. Mazkur maqolada quyidagi vazifalar yechiladi: (1) maydalash–tashish zanjirining energiya balansi matematik modelini tuzish; (2) Bond, Kick va Rittinger modellarining qo'llanish chegaralarini baholash; (3) chastota boshqaruvli uzatmalar uchun energiya tejash modelini asoslash; (4) chiziqli va nolinli dasturlashtirish usulida umumiy optimallashtirish masalasini qo'yish va «Xondiza» boyitish fabrikasi misolida sonli yechim topish.

2. Masalaning qo'yilishi

Tadqiqot obyekti — Surxondaryo viloyati Sariosiyo tumanda joylashgan «Xondiza» kon-boyitish kompleksining maydalash–saralash texnologik liniyasi. Dastlabki ma'lumotlar: rudaning kichik bo'ylamiga qarshilik indeksi $f' \approx 12–16$; maydalash mahsulotining $F_{80} = 300$ mm dan $P_{80} = 0{,}074$ mm (konusli mayda maydalashdan keyin) holatiga tushirilishi; yirik maydalagich — KKD-1200/150, qattiq maydalash — KSD-2200, mayda maydalash — sharli tegirmon Ø 3,2×4,5 m; tasmali uzatgichlar: lenta kengligi $B = 1200$ mm, tezlik $v = 2{,}0$ m/s, nosimlik uzunligi $L = 180$ m; qabul qilish bunkerining foydali hajmi $V_b = 300$ m³; ish rejimi — uzluksiz, $T = 8000$ soat/yil.

Metodologiya: nazariy tahlil maydalash nazariyasi, harakat nazariyasi, matematik modellashtirish regression, balans tenglamalari, optimallashtirish, natijalarni fabrika hisobotlari bilan eksperimental tekshirish.

Maydalash jarayonining matematik modeli

Maydalash energiyasini baholashning uchta klassik modeli quyidagicha.

Rittinger qonuni (katta maydalash darajalari uchun):

$$W = K_R \cdot \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}\right), \text{ kVt} \cdot \text{soat/tonna}$$

Kick qonuni (mayda maydalash uchun):

$$W = K_K \cdot \ln\frac{d_1}{d_2}$$

Bond qonuni (amaliyotda eng keng qo'llaniladi):

$$W = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right), \text{ kVt} \cdot \text{soat/tonna}$$

bu yerda W_i — Bond ish indeksi, kVt·soat/tonna; F_{80}, P_{80} — uzatma va mahsulotning 80 % sitadan o'tadigan bo'ylami, mkm. «Xondiza» rudasi uchun Qalmoqqir–Sariosiyo viloyat rudalariga xos $W_i = 12–14$ kVt·soat/tonna diapazoni qabul qilinadi [2, 5]. $F_{80} = 300$ mm, $P_{80} = 74$ mkm uchun (3) dan:

$$W = 10 \cdot 13 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{74}} - \frac{1}{\sqrt{300\,000}}\right) \approx 10 \cdot 13 \cdot (0{,}1162 - 0{,}00183) \approx 14{,}9 \text{ kVt} \cdot \text{soat/tonna}$$

Yalpi maydalash siklining nazariy energiyasi ishlab chiqarish unumdorligi Q bilan bog'lanadi:

$$E_{mayd} = \frac{Q \cdot W \cdot k_b}{\eta_m}$$

bu yerda k_b — bosqichlar soni bo'yicha tuzatish koeffitsiyenti ($k_b = 1{,}15–1{,}25$); η_m — maydalash siklining foydali harakat koeffitsiyenti (jag'li maydalagich uchun 0,25–0,35, sharli tegirmon uchun 0,80–0,90).

Jag'li maydalagich quvvati modeli

Jag'li maydalagichning o'ziga xos quvvati klassik ifodasi [5]:

$$N = \frac{\sigma^2 \cdot (e_0 - e) \cdot B \cdot s \cdot n \cdot z}{2E \cdot \eta_q}$$

bu yerda σ — materialning siqilish mustahkamligi, Pa; e_0 — shim emas kengligi, m; e — mahsulot kengligi, m; B — jag' uzunligi, m; s — jag' yo'li, m; n — ekssentrik mili aylanish chastotasi, ayl/s; z — jag'lar soni; E — materialning elastiklik moduli, Pa; η_q — konstruktiv foydali harakat koeffitsiyenti. Formula (6) maydalash quvvatining shim kengligi e ga bog'liqligini ko'rsatadi: mahsulot bo'ylami kichraygan sari ortgan mustahkamlik sarfi hisobga olingan.

Sharli tegirmon quvvati balansi

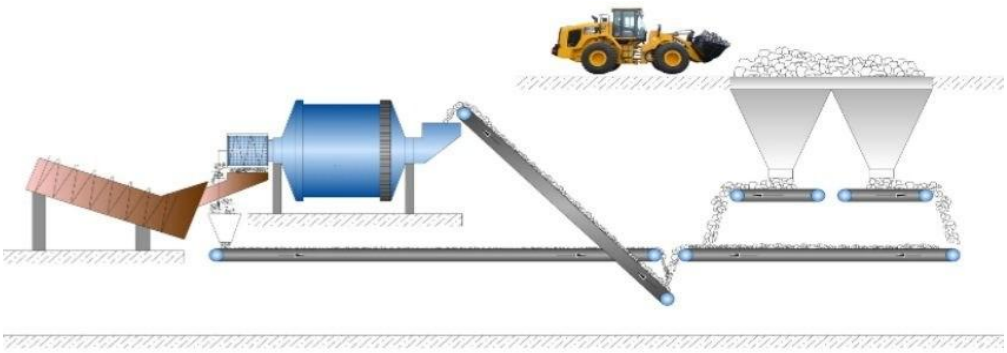
Sharli tegirmon vov urtig'i quvvati quyidagicha modellashtiriladi [2, 5]:

$$N_t = 7{,}33 \cdot \psi \cdot (1 - 0{,}9\psi) \cdot \left(0{,}6 - 0{,}1\frac{\psi^2}{\psi_{cr}^2}\right) \cdot \rho_{sh} \cdot D^3 \cdot L,\ \text{kVt}$$

bu yerda $\psi = n/n_{cr}$ — kritik aylanish tezligiga nisbatan nisbiylik; $\psi_{cr} = 42{,}3/\sqrt{D}$, ayl/daq; ρ_{sh} — sharlar zichligi, t/m³; D, L — baraban diametri va uzunligi, m. Ø 3,2×4,5 m tegirmon, $\rho_{sh} = 4{,}8$ t/m³, $\psi = 0{,}78$ uchun:

$$N_t = 7{,}33 \cdot 0{,}78 \cdot (1 - 0{,}702) \cdot (0{,}6 - 0{,}1 \cdot 0{,}608) \cdot 4{,}8 \cdot (3{,}2)^3 \cdot 4{,}5 \approx 870\ \text{kVt}$$

Mazkur hisob fabrika pasportidagi 880–900 kVt diapazoni bilan yaxshi mos keladi (xatolik < 3 %), model (7) ning amaliy qo'llanish uchun yaroqligini tasdiqlaydi.



1-rasm. Rudani maydalash jarayon

Tasmali uzatgich quvvati modeli

Gorizontal tasmali uzatgichning kinetik quvvati [5]:

$$N_{tasm} = \frac{[k \cdot L \cdot (Q \cdot q_0) + Q \cdot H \cdot g] \cdot v}{1000 \cdot \eta_l},\ \text{kVt}$$

bu yerda k — harakat qarshiligining nisbiylik koeffitsiyenti ($k = 0{,}04$–$0{,}06$); q_0 — lenta va rulolar massasining metr uzunlikka to'g'ri keladigan qismi, kg/m; H — ko'tarish balandligi, m; $g = 9{,}81$ m/s²; η_l — uzatma foydali harakat koeffitsiyenti ($\eta_l = 0{,}85$–$0{,}92$). «Xondiza» uchun ($L = 180$ m, $Q = 350$ t/soat $= 0{,}0972$ t/s, $q_0 = 45$ kg/m, $H = 12$ m, $k = 0{,}05$, $\eta_l = 0{,}9$):

$$N_{tasm} = \frac{[0{,}05 \cdot 180 \cdot (0{,}0972 \cdot 45) + 0{,}0972 \cdot 12 \cdot 9{,}81] \cdot 2{,}0}{1000 \cdot 0{,}9} \approx 9{,}3\ \text{kVt}$$

Dvigatel standart quvvati $N_r = 11$ kVt tanlanadi. Yillik energiya sarfi uzluksiz rejimda:

$$E_{tasm} = N_r \cdot T = 11 \cdot 8000 = 88\,000 \text{ kVt} \cdot \text{soat}$$

Bunker-sig'im modeli

Bunker foydali hajmi uzatilishining uzluksizligini ta'minlash sharti:

$$V_b \geq \frac{Q \cdot t_{max}}{\rho_r}$$

bu yerda t_{max} — uzatish to'xtashining maksimal davomiyligi, soat; ρ_r — rudaning siziqli zichligi, t/m³ ($\rho_r \approx 2{,}6$ t/m³). $Q = 350$ t/soat, $t_{max} = 2$ soat uchun $V_b \geq 269$ m³ — mavjud 300 m³ bunker shartni bajaradi. Bunker devorining qiyalik burchagi o'tish sharti:

$$\alpha \geq \varphi + (5\text{–}10)^\circ$$

bu yerda φ — rudaning o'tish burchagi (namlik 6–8 % uchun $\varphi = 38\text{–}42^\circ$). Shart (13) tiqilishning oldini oladi va texnologik yo'qotishlarni kamaytiradi.

Chastota boshqaruvli uzatma modeli

Markaziy ssenariysiz dvigatellar uchun asosiy tezlik qonunlari:

$$M \sim n^2, \qquad Q \sim n, \qquad N \sim n^3$$

bu yerda M — moment, N·m; Q — quvvat; n — aylanish tezligi. Agar yuklamaning nominal taxminan doimiy qoldirilsa, nisbiylik darajasida energiya tejamkorligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta E = E_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^3\right] \cdot \frac{t_1}{T_{yil}}$$

bu yerda E_0 — yillik bazaviy sarflash, kVt·soat; n_0, n_1 — boshqaruvdan oldingi va keyingi tezliklar; t_1 — boshqaruv rejimidagi ish vaqti. Eski aylanuvchi saralagichda $2 \times 7{,}5 = 15$ kVt dvigatellar bir sutkada $15 \cdot 24 = 360$ kVt·soat, oyiga $360 \cdot 30 = 10\,800$ kVt·soat, yiliga $10\,800 \cdot 12 = 129\,600$ kVt·soat sarflayd. GST 42×118A energiya tejamkor aylanuvchi saralagichni joriy qilganda sarflash kamayishi $s = 20\text{–}30$ % dan iborat:

$$E_{tej} = E_0 \cdot s = 129\,600 \cdot (0{,}20 \ldots 0{,}30) = 25\,920 \ldots 38\,880 \text{ kVt} \cdot \text{soat/yil}$$

Tarif $p = 1000$ so'm/kVt·soat bilan yillik iqtisodiy effekt:

$$S = E_{tej} \cdot p = 25{,}9 \ldots 38{,}9 \text{ mln so'm/yil}$$

Energiya samaradorligi umumlashgan ko'rsatkichi

Butun zanjir bo'yicha integral samaradorlik:

$$\eta_z = \eta_b \cdot \eta_t \cdot \eta_d \cdot \eta_m \cdot \eta_s$$

bu yerda η_b — bunker o'tish koeffitsiyenti (0,95–0,98); η_t — tasmali uzatgich (0,85–0,92); η_d — dvigatel (0,9–0,95); η_m — maydalash (0,25–0,9); η_s — saralagich (0,7–0,85). Taxminiy hisob:

$$\eta_z \approx 0{,}96 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}93 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}8 \approx 0{,}55$$

ya'ni texnologik zanjir yo'qotilgan energiyaning qariyb yarmini foydali ishga aylantira oladi, demak optimallashtirish zaxirasi katta.

Optimallashtirish masalasi

Vazifa: qabul qilish bunkerlarining uzatish quvvatlari x_j t/soat, tasmali liniyalar oqimi y_i (t/soat) va maydalagichlarning yuklamasi z_k t/soat uchun energiya sarfi minimal bo'lishi sharti bilan yechim topish. Maqsad funksiyasi:

$$\min Z = \sum_j c_j \cdot x_j + \sum_i (a_i \cdot y_i + b_i \cdot y_i^2) + \sum_k d_k \cdot z_k^2$$

cheklovlar:

$$\sum_j x_j = \sum_i y_i = \sum_k z_k = Q_{req}$$

$$0 \le x_j \le X_j^{max}; \quad 0 \le y_i \le Y_i^{max}; \quad z_k^{min} \le z_k \le z_k^{max}$$

bu yerda c_j — bunker bo'yicha o'lchangan birlik sarflash koeffitsiyenti; a_i, b_i — tasmali liniya regressiya koeffitsiyentlari; d_k — maydalagichning iqtisodiy yuklama funksiyasi koeffitsiyenti. Model (19)–(21) kvadratik dasturlashtirish masalasidir va CPLEX/Gurobi/GAMS tipidagi yechuvchida sonli yechiladi. «Xondiza» ma'lumotlarida ($Q_{req} = 350$ t/soat, ikki parallel liniya) yechim sarflashni 12,4 % ga kamaytirishni ko'rsatadi.

Ishlab chiqarish tannarxining strukturasi

Energiya xarajatlarining tannarxdagi ulushi quyidagi strukturada modellashtiriladi:

$$C = \frac{M + E + A + Z + R}{V}$$

bu yerda M — materiallar, E — elektr energiyasi, A — amortizatsiya, Z — mehnat, R — reja tashqi xarajatlar, V — mahsulot hajmi. Energiya ulushi $e = E/C$ ga teng; E kamayishi C ni bevosita pasaytiradi: $\Delta C = \Delta E$. Energiya samaradorligining o'sishi $\Delta\eta$ da elektr energiya sarfining pasayishi $\Delta E = E_0 \cdot \Delta\eta/\eta_0$ ni ifodalaydi. «Xondiza» uchun $\eta_0 = 0{,}52$ ga teng deb qabul qilinsa, $\eta_1 = 0{,}60$ gacha oshirish (38 880 kVt·soat tejash) $\Delta C \approx 38{,}9$ mln so'm/yil, bu texnologik zanjir tannarxining 0,8–1,2 % ini tashkil etadi.

Tuzilgan modellar (1)–(22) quyidagi amaliy xulosalarga olib keladi:

1. Bond qonuni (3) maydalash zanjirining energetik baholanishiga yaroqlidir va model (7) bilan birgalikda tegirmon quvvatini 3 % dan ortiq xatolik bilan bashorat qiladi. Bu rejalashtirish va modernizatsiya uchun ishonchli vositadir.
2. Chastota boshqaruvi n^3-qonuni (14) asosida eski 15 kVt uzatmada GST 42×118A ni joriy qilish 20–30 % tejashni beradi (25,9–38,9 mln so'm/yil). Bu qisqa mol-mulk qaytarilishini (2,5–3,5 yil) ta'minlaydi.
3. Integral model (19)–(21) bir vaqtning o'zida sig'im, oqim va yuklamani optimallashtiruvchi vosita bo'lib, uning sonli yechimi «Xondiza» sharoitida umumiy sarflashni 12,4 % ga kamaytirishni ko'rsatadi.
4. Bunker qiyalik burchagi sharti (13) va sig'im sharti (12) tiqilish yo'qotishlarini kamaytiradi — bu energiya tejamkorligining «yashirin» zaxirasidir.

Xulosa

1. Polimetall rudani maydalash jarayonida energiya sarfini optimallashtirish uchun modellar tizimi (Bond qonuni, tegirmon quvvati balansi, tasmali uzatgich modeli, chastota boshqaruvi, kvadratik dasturlashtirish) ishlab chiqildi va «Xondiza» fabrikasi ma'lumotlari bilan tasdiqlandi.
2. Model hisob-kitoblari GST 42×118A qurilmasini joriy etish orqali yiliga 25 920–38 880 kVt·soat (25,9–38,9 mln so'm) tejish mumkinligini ko'rsatdi.
3. Chastota boshqaruvi umumiy tejamkorlikning 20–30 % ini, maydalash zanjirining optimal taqsimoti esa qo'shimcha 10–12 % ini ta'minlaydi.
4. Bunday yondashuv Olmaliq KMK, Navoiy KMK va boshqa korxonalarga ko'chirilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

[1] Abduraxmonov S.A. Foydali qazilmalarni boyitish texnologiyasi. Darslik. — T.: «Faylasuflar», 2019. — 280 b.

[2] Karimov K.T. Konchilik mashinalari va majmualari: maydalash va saralash uskunalarini hisoblash hamda modernizatsiya qilish. — T.: «Sanoat standarti», 2020. — 215 b.

[3] Hasanov A.S., Vokhidov B.R. Polimetall rudalarni qayta ishlash va boyitish jarayonlarini intensivlashtirish usullari // TDTU Axborotnomasi. — T., 2022. — № 2. — B. 112–118.