

**NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI DSc.17/04.06.2021.T.06.02
RAQAMLI ILMIY KENGASH**

NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR UNIVERSITETI

ABDULLAYEV SARDOR HUSNIDDINOVICH

**SHARLI TEGIRMONLAR QOPLAMALARINI KONSTRUKSIYASINI
TAKOMILLASHTIRISH ASOSIDA ULARNING ISHLASH
SAMARADORLIGINI OSHIRISH**

04.00.16 – Konchilik mashinalari

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Navoiy – 2025

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati
mundarejasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по техническим наукам**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
of technical sciences**

Abdullayev Sardor Husniddinovich

Sharli tegirmonlar qoplamalarini konstruksiyasini takomillashtirish asosida
ularning ishlash samaradorligini oshirish.....3

Абдуллаев Сардор Хусниддинович

Повышение эффективности работ шаровых мельница основе
совершенствования конструкции их футеровок.....21

Abdullayev Sardor Husniddinovich

Improving the efficiency of ball mills by improving the design
of their linings.....39

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ
List of published works.....42

**NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI DSc.17/04.06.2021.T.06.02
RAQAMLI ILMIY KENGASH**

NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR UNIVERSITETI

ABDULLAYEV SARDOR HUSNIDDINOVICH

**SHARLI TEGIRMONLAR QOPLAMALARINI KONSTRUKSIYASINI
TAKOMILLASHTIRISH ASOSIDA ULARNING ISHLASH
SAMARADORLIGINI OSHIRISH**

04.00.16 – Konchilik mashinalari

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Navoiy – 2025

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida №B2025.1.PhD/T5277 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.nsumt.uz) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portaliga (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Abduazizov Nabijon Azamatovich
texnika fanlari doktori (DSc), professor

Rasmiy opponentlar:

Egamberdiyev Ixom Pulatovich
texnika fanlari doktori (DSc), professor

Rayxonov Shuhrat Zaripovich
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Yetakchi tashkilot:

«Olmaliq kon-metallurgiya kombinati» AJ

Dissertatsiya himoyasi Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti huzuridagi DSc.17/04.06.2021.T.06.02 raqamli ilmiy kengashning 2025-yil 28-noyabr soat 10⁰⁰ daqi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 210100, Navoiy shahri, G'alaba Shoh ko'chasi, 76v-uy. Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universitetining majlislar zali. Tel.: (79) 223-04-40; faks: (79) 223-49-66; E-mail: info@nsmut.uz, nsmi@gmail.com)

Dissertatsiya bilan Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (236-raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 210100, Navoiy shahri, G'alaba Shoh ko'chasi, 76v-uy. Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universitetining majlislar zali. Tel.: (79) 223-04-40; faks: (79) 223-49-66.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil «13» noyabr kuni tarqatildi.
(2025-yil «13» noyabr 161-raqamli reestr bayonnomasi).



I.T.Mislibayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
raisi, t.f.d., professor

R.U.Djurayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, t.f.d., professor

A.B.Tuxtashev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi o'rinbosari, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda qazib olingan foydali qazilmalarni qayta ishlash jarayonlarini jadallashtirish, takomillashtirilgan yanchish uskunalarni qo'llash orqali boyitish korxonalarining samaradorligini oshirish talab etiladi. Amaliyot shuni ko'rsatadiki, sharli tegirmonlarning rejalashtirilmagan to'xtalishlarning umumiy ulushidan 52% qoplamalarning yedirilishi sabab bo'lmoqda. Tog' jinslari va sharlar bilan doimiy ishqalanish, bosim va zarbalar ta'sirida tegirmon barabanining qoplamalari yedirilishi ishlab chiqarish samaradorligini keskin pasaytiruvchi omil sifatida dolzarb muammolaridan biri bo'lib qolmoqda. Sharli tegirmonlarning ekspluatatsiya tannarxini kamaytirish, ishchi a'zolarining ishonchliligini oshirish orqali ularning ishlash vaqtini uzaytirish bilan bog'liq masalalar hozirgi kunga qadar ham dolzarbligicha saqlanib qolmoqda va uni hozirda yechish muhim ahamiyat kasb etadi.

Bugungi kunda jahonda tog' jinslarini yanchishda sharli tegirmonlardan foydalanishda ularning ish rejimini to'g'ri tanlab samaradorligini oshirish, tog' jinslarini yanchish jarayonida tegirmon qoplamalarini ruda va metall sharlar bilan o'zaro ta'sirini nazariy tadqiq qilish, tegirmon qoplamalarini yedirilishga chidamli bo'lgan yangi konstruksiyasini ishlab chiqish, tegirmon barabanining himoya qoplamalarning samaradorligini oshirish bo'yicha ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Bu borada sharli tegirmon himoya qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarini ishlab chiqish asosida ularning ekspluatatsion samaradorligini oshirishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Respublikamizda foydali qazilmalarni qazib olish ishlarini jadallashtirish, ularni qayta ishlash va boyitish ko'rsatkichlarini oshiruvchi samarali usullarni tadqiq qilish, sharli tegirmonlarning yanchish ko'rsatkichlarining samaradorligini oshirish bo'yicha ilg'or ilmiy asoslangan chora-tadbirlarni joriy qilinib, bir qator ilmiy-amaliy natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmonida¹ «ishlab chiqarishni jadal rivojlantirishga qaratilgan sifat jihatidan yangi bosqichga o'tkazish orqali sanoatni yanada modernizatsiya va diversifikatsiya qilish, prinsipial jihatdan yangi texnologiya turlarini o'zlashtirish, energiya va resurslar sarfini kamaytirish, ishlab chiqarishga energiya tejaydigan texnologiyalarni keng joriy etish...» kabi muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalardan kelib chiqqan holda, sharli tegirmonlarning ish unumdorligini oshirish, tegirmon ishchi a'zolarining resurs tejamkorligini oshirish, tegirmon qoplamalarini ishlab chiqarish tannarxini kamaytirish katta ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022-2026 yillarda yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi, 2015-yil 4-martdagi PF-4707-son «Ishlab chiqarishni strukturaviy qayta tuzish, modernizatsiyalash va diversifikatsiyalashni ta'minlash bo'yicha 2015-2019-yillarga mo'ljallangan chora-tadbirlar dasturi to'g'risida»gi Farmonlari va 2019-yil 17-yanvardagi PQ-4124-son «Kon-metallurgiya tarmog'i korxonalarini faoliyatini

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «2022-2026 yillarda yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida» gi Farmoni

yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi Qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning Respublika ilm-fan va texnologiyalarni rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning VII. «Yer to'g'risidagi fanlar (geologiya, geofizika, seysmologiya va mineral xom ashyolarni qayta ishlash)» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Sharli tegirmonlarning samaradorligini oshirish nazariyasi va amaliyotini rivojlanishiga Kryukov D.K., Andreev S.Ye., Bogdanov V.S., Verdiyev M.A., Dashko Yu.I., Neronov N.P., Olevskiy V.A., Pavell M.S., Andreev Ye.Ye., Andreev S.Ye., Malyarov P.V., Perov V.A., Dun I.F., Penkin N.S., Sanaqulov Q.S., Egamberdiyev I.P. va boshqalar katta hissa qo'shishgan, ular tomonidan sharli tegirmonlarda yanchish jarayonini samaradorligini oshirish va qoplama materiallarining yedirilish tezligini kamaytirish ishlariga ilmiy va amaliy nuqtayi nazardan yondashilgan. Biroq, bugungi kunda sharli tegirmonlarning silindr qismiga o'rnatiladigan qoplamalarning va silindr qismidagi tuynuklar uchun mo'ljallangan qoplamalarning yedirilishga bardoshli takomillashtirilgan konstruksiyalarini ishlab chiqish asosida yanchish ishlarining samaradorligini oshirish muammolari to'liq o'rganilmagan.

Shu munosabat bilan konchilik sanoati uchun muhim bo'lgan sharli tegirmon qoplamalarini resurs tejankor konstruksiyalarini ishlab chiqish hamda yanchish jarayonidagi sharli tegirmon qoplamalari, sharlar va tog' jinslari o'rtasidagi dinamik o'zaro ta'sir jarayonlarini modellashtirish va ularning yedirilish jarayonini tadqiq qilish zaruriyati yuzaga keladi va bu yo'nalishda keyingi tadqiqotlarni davom ettirish lozim.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarini bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining №01-01/26 raqamli «Maydalash-ezish tog'-kon uskunalarning yangilangan tarkibli zirh qotishmalarini ishlab chiqish va ishlash muddatini uzaytirish» (2023-2024 y.) mavzusidagi xo'jalik shartnomasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi sharli tegirmon himoya qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarini ishlab chiqish asosida ularning ekspluatatsiya samaradorligini oshirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

sharli tegirmonlarning yanchish ko'rsatkichlarining samaradorligini va ularning himoya qoplamalari ish resursini oshirishning zamonaviy holatini tahlil qilish hamda asosiy yo'nalishlarini aniqlash;

yanchish jarayonida tegirmon qoplamalarining tog' jinslari va metall sharlar bilan o'zaro ta'sirini nazariy tadqiq qilish;

sharli tegirmon qoplamalari uchun ilashish koeffitsientini aniqlash hamda takomillashtirilgan qoplamalarning yedirilish darajasi va ilashish koeffitsiyentlarini hisoblash imkonini beruvchi matematik model ishlab chiqish;

sharli tegirmonlarning silindr qismiga o'rnatiladigan qoplamalarning va silindr qismidagi tuynuklar uchun mo'ljallangan qoplamalarning yedirilishga bardoshli takomillashtirilgan konstruksiyalarini ishlab chiqish;

yanchish jarayonidagi sharli tegirmon qoplamalari, sharlar va tog' jinslari o'rtasidagi dinamik o'zaro ta'sir jarayonlarini modellashtirish va ularning yedirilish jarayonini tahlil qilish.

Tadqiqotning obyekti sifatida sharli tegirmon barabani silindr qismi va silindr qismidagi tuynuklaridagi himoya elementlari olingan.

Tadqiqotning predmetini sharli tegirmon qoplamalarni takomillashtirilgan konstruksiyalarini ishlab chiqish asosida yedirilishga bardoshligi va ishonchliligi tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida sharli tegirmon himoya qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarini ishlab chiqish asosida ularning ekspluatatsion samaradorligini oshirishning nazariy va eksperimental usullari, sanoat sharoitida eksperimental tadqiqotlar va matematik statistika usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

sharli tegirmon qoplamalarida ilashish koeffitsiyenti miqdorining o'zgarishi normal reaksiya kuchi, og'irlik kuchi va ta'sir kuchi hisobidan hosil bo'ladigan ishqalanish koeffitsiyentlari qiymatlari asosida aniqlangan;

tog' jinslarini sharli tegirmonda yanchish jarayonida ilashuv kuchlari va harorat miqdorlarini hisobga olgan holda, qoplamaning tog' jinsi hamda po'lat sharlar bilan o'zaro ta'siri natijasida shakllanadigan ilashish koeffitsiyentlarining o'zaro bog'liqligi aniqlangan hamda ularni hisoblash imkonini beruvchi matematik model ishlab chiqilgan;

sharli tegirmon barabani silindr qismi qoplamalari konstruksiyasi sharlar va tog' jinslari o'rtasidagi o'zaro dinamik ta'sir jarayonlarini modellashtirish asosida takomillashtirilgan;

sharli tegirmon va tog' jinslarining geometrik parametrlari, ilashish koeffitsiyenti, kontakt yuzada hosil bo'luvchi bosim va material qattiqligini hisobga olgan holda tegirmon qoplamalarining hajmiy yedirilish miqdorlarini aniqlash imkonini beruvchi matematik model ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

tegirmon barabanining silindr qismi qoplamasini yedirilishini 25 % gacha kamaytirish imkonini beruvchi takomillashtirilgan qoplama konstruksiyasi ishlab chiqilgan;

tegirmon barabanining silindr qismi tuynuklari qoplamalarini yedirilishga chidamliligini 24% gacha oshirish imkonini beruvchi takomillashtirilgan qoplama konstruksiyasi ishlab chiqilgan;

takomillashtirilgan qoplamalarining yedirilish miqdorini aniqlash imkonini beruvchi dasturiy ta'minot yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi tadqiqot natijalarining ishonchliligi sanoat sharoitidagi tajribalar, ko'plab nazariy hisoblashlar va sharli tegirmonlar ekspluatatsiyasi ishonchliligini oshiruvchi usullarini ishlab chiqishda ishning asosiy g'oyasini qoniqarli darajada va miqdoriy jihatdan tasdiqlanishi, shuningdek, sharli tegirmonlarining ishlash rejimini samaradorligini oshiruvchi baraban silindr qismi

takomillashtirilgan qoplamalarining eksperimental sinovlarining ijobiy natijalari bilan isbotlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati tog' jinslarini sharli tegirmonda yanchish jarayonida ilashuv kuchlari va harorat miqdorlarini hisobga olgan holda, qoplamaning tog' jinsi hamda po'lat sharlar bilan o'zaro ta'siri natijasida shakllanadigan ilashish koeffitsiyentlarining o'zaro bog'liqligini hisoblash imkonini beruvchi matematik model ishlab chiqish va tegirmon barabanining silindr qismi qoplamasini konstruktsiyasini takomillashtirish asosida uning samaradorligini oshirish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati sharli tegirmon barabani qoplamalarining hajmiy yedirilish miqdorini aniqlash imkonini beruvchi dasturiy ta'minot yaratish, baraban silindr qismi hamda silindr qismidagi tuynuklar uchun yangi konstruktsiyadagi yuqori chidamlilikka ega bo'lgan qoplamalarni ishlab chiqish orqali tegirmonlarning samaradorligini oshirishga xizmat qilish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Sharli tegirmon barabani silindr qismi qoplamalari konstruktsiyasini takomillashtirish evaziga yanchish jarayoni ko'rsatkichlarining samaradorligini oshirish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

sharli tegirmon barabani silindr qismi qoplamalari «Navoiy kon-metallurgiya kombinati» AJga qarashli 2-gidrometallurgiya zavodida amaliyotga joriy etilgan («Navoiy kon-metallurgiya kombinati» AJning 2025-yil 20-martdagi 23/01-01-07/220-son ma'lumotnomasi). Natijada, MMS-7000x2300 rusumli tegirmonlarining avvalgi qo'llanilgan qoplamalariga nisbatan yedirilishga chidamliligi 25% ga oshish imkonini bergan;

sharli tegirmon barabani silindr qismi tuynuk (lyuk) lari qoplamalari «Navoiy kon-metallurgiya kombinati» AJga qarashli 2-gidrometallurgiya zavodida amaliyotga joriy etilgan («Navoiy kon-metallurgiya kombinati» AJning 2025-yil 20-martdagi 23/01-01-07/220-son ma'lumotnomasi). Natijada, MMS-7000x2300 rusumli tegirmon barabani silindr qismi tuynuk (lyuk) larida avvalgi qo'llanilgan qoplamalariga nisbatan yedirilishga chidamliligi 25% ga oshish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatyasi. Mazkur tadqiqotning natijalari 3 ta respublika va 2 ta xalqaro ilmiy-amaliy anjumanlarda aprobatiya qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 12 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola, jumladan, Respublika nashrlarida 4 ta va xorijiy jurnallarda 2 ta maqola chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 118 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida tadqiqotning ahamiyati va dolzarbligi asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekti va predmeti aniqlangan, tadqiqot ishining Respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning muhim yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan

hamda tadqiqotning ilmiy yangiligi, natijalarning ishonchliligi, nazariy va amaliy ahamiyati, natijalarning amaliyotga joriy etilishi, e'lon qilinganligi, ishning tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Sharli tegirmonlarning yanchish jarayonlari ko'rsatkichlari samaradorligini oshirishning zamonaviy holati va ilmiy tadqiqotlarning tahlili**» deb nomlangan birinchi bobida tog' jinslarining yanchishda qo'llaniladigan sharli tegirmonlarning ekspluatatsion ko'rsatkichlari tahlili, tog' jinslarining fizik-mexanik xususiyatlari va ularning yanchish jarayoniga ta'sirining tahlili, sharli tegirmonlarning ish resursiga ta'sir etuvchi salbiy omillar tadqiqoti, dissertatsiya mavzusi bo'yicha amalga oshirilgan ilmiy tadqiqot ishlari holati tahlili, sharli tegirmonlarda qo'llaniladigan amaldagi qoplama turlarining tahlili va ularning samaradorligini oshirish istiqbollari hamda sharli tegirmonlar yanchish rejimi ko'rsatkichlari samaradorligini oshirishning asosiy yo'nalishlari keltirilgan.

Sharli tegirmonlarning samaradorligi pasayishi bir qancha omillarga bog'liq bo'lib, bunda 52% ni qoplamalarning eskirishi, 17% ni elektr qismi nosozligi, 13% ni tishli uzatma tishining yedirilishi yoki sinishi, 8% ni moylash tizimi, 7% ni yuk oqimining kelmay qolishi, 3% ni sharlar diametri va hajmi tashkil qilishi va bu ko'rsatkichlar tegirmonning ekspluatatsion ko'rsatkichlariga salbiy ta'sir etishi aniqlandi.

Texnologik jarayonlar davomida kutilmagan to'xtalishlarning tez-tez sodir bo'lishi, ishchi organlarning jadal yedirilishi yoki ishdan chiqishi, shuningdek, barabanning ichki yuzasini himoyalovchi qoplamalarning yetarli darajada ishonchli ishlamasligi – tegirmonning umumiy samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatmoqda.

Shunday qilib, sharli tegirmonlar ishlash samaradorligini oshirishning asosiy yo'nalishlari sifatida tegirmon barabanini silindr qismi hamda silindr qismi tuynugini himoyalovchi yedirilishga chidamli va uzoq muddat ishlatilish qobiliyatiga ega bo'lgan takomillashtirilgan qoplamalarining yangi konstruksiyasini ishlab chiqish hisobiga uning uzoq muddat ishlashini ta'minlash ishimizning keyingi asosiy vazifalari etib tanlab olindi.

Dissertatsiyaning «**Yanchish jarayonida tegirmon qoplamalarini tog' jinslari va metall sharlar bilan o'zaro ta'sirining tadqiqoti**» deb nomlangan ikkinchi bobida yanchish jarayonida sharli tegirmonlarning ish rejimlari va uning qoplamalarida hosil bo'ladigan yuklamalar, qoplama profiliga ta'sir qiluvchi kuch va koeffitsiyentlari nazariy tahlil qilingan, sharli tegirmon qoplamalari yedirilishi ko'rsatkichlarining ilashish koeffitsiyentiga bog'liqligi tadqiq qilingan, sharli tegirmon qoplamalari uchun ilashish koeffitsiyentini aniqlashning matematik modeli ishlab chiqilgan.

Ilashish koeffitsienti qiymatini o'zgartirish uchun tog' jinslari va sharlar yuki hamda qoplama ishtirokida yuzaga keladigan ishqalanish koeffitsienti qiymati bilan ilashish koeffitsienti qiymatini, qoplama yuzasiga ta'sir etuvchi umumiy tangensial va normal kuchlarning qiymatlari nisbatini ma'lum bir chegarada o'zgartirish orqali erishish mumkin (1-formula).

$$K_i \sum N \geq \sum T \quad \text{yoki} \quad K_i \geq \frac{\sum T}{\sum N} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} \quad (1)$$

bu yerda, K_i – ilashish koeffitsiyenti; $\sum N$ – normal kuchlar yig'indisi; $\sum T$ – tangensial kuchlar yig'indisi.

Ilashish koefitsiyenti K_i aniqlashda markazga intilma kuch va tangensial kuch orasidagi burchakni quyidagicha belgilanadi:

$$\alpha_f + \lambda_x = 90; \quad \Rightarrow \quad \lambda_x = 90 - \alpha_f \quad (2)$$

Tegirmon barabani ichki yuzalariga ta'sir etuvchi kuchlarni aniqlash uchun 2 – ifodadagi muvozanat tenglamalariga asosan Dalamber prinsipiga asoslanib quyidagi tizimli ifodalar tuzib olindi:

$$\begin{cases} \sum F_x = ma_x = T_N \cdot \cos \alpha_f + G \cdot \cos(90 - a_{NG}) - N_N \cdot \cos(90 - a_\alpha) = 0 \\ \sum F_y = ma_y = F_N + N_N \cdot \cos \alpha_f + G \cdot \cos a_{NG} + T_N \cdot \cos \lambda_x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Dalamber prinsipiga asosan, dinamik ifoda statik ifodaga aylantiriladi va bunda $a_x = 0$, $a_y = 0$ shartlar qabul qilindi.

$$T_N \cdot \cos \lambda_x = |-(F_N + N_N + G \cdot \cos a_{NG})|; \quad T_N = \frac{(F_N + N_N \cdot \cos \alpha_f + G \cdot \cos a_{NG})}{\cos \lambda_x} \quad (4)$$

bu yerda, $\sum F_x - X$ o'qidagi barcha kuchlarni yig'indisi; $\sum F_y - Y$ o'qidagi barcha kuchlarni yig'indisi; $a_x - X$ o'qidagi tezlanish vektori; $a_y - Y$ o'qidagi tezlanish vektori; G – og'irlik kuchi; N_N – normal reaksiya kuchi.

Markazga intilma kuch va tangensial kuch orasidagi burchak va yuk oqimi og'irligi va reaksiya kuchi orasidagi burchakni aniqlash uchun quyidagicha bog'liqlik funksiyasi tuzildi.

$$\psi = f_1(a_f, a_{NG}, \lambda_x) \quad (5)$$

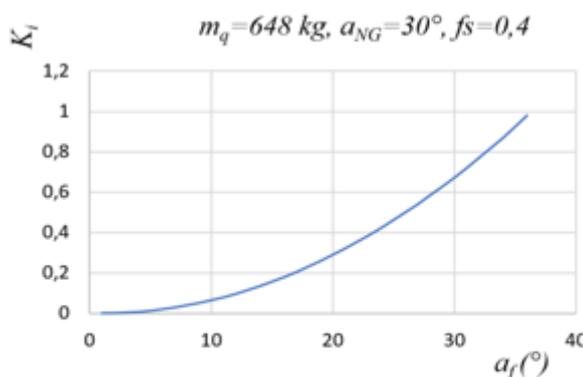
Normal reaksiya kuchi orqali hamda 5 – ifodada keltirilgan funksiya qiymatlaridan foydalangan holda qoplamalarni yedirilishiga ta'sir qiluvchi kuch va koefitsiyentlarni o'zaro bog'liqliklari quyidagicha aniqlanadi.

$$K_i = \frac{\cos(90 - a_f)}{\cos \alpha_f} - \frac{m_q g \cdot \cos(90 - a_{NG})}{N \cdot \cos \alpha_f} \quad (6)$$

Qoplamalarni yedirilishiga ta'sir qiluvchi kuch koefitsiyentini markazga intilma kuch, tangensial kuch orasidagi burchak va yuk oqimi og'irligi, reaksiya kuchi orasidagi burchak, yuk massasi va ishqalanish koefitsenti orqali quyidagi funksiya o'zgaruvchilarini bog'lab aniqlandi.

$$K_i = f_2(\psi, m_y, f_s); \quad F_{ish} = N \cdot f = mg \cdot f_s; \quad K_i = \tan \alpha_f - \frac{m_q}{m_y} \cdot \frac{\cos(90 - a_{NG})}{f_s \cdot \cos \alpha_f} \quad (7)$$

bu yerda, a_f – normal kuch va reaksiya kuchi orasidagi burchak; a_{NG} – yuk oqimi og'irligi va reaksiya kuchi orasidagi burchak; m_q – qoplamalar massasi, kg; m_y – yuk oqimi og'irligi, kg.



1-rasm. Sharli tegirmon qoplamalar ishqalanish koefitsiyentining ilashish koefitsiyentiga bog'liqlik grafigi

1-rasmda 7-formulaga asosan ishqalanish koefitsiyent, normal reaksiya kuchi va og'irlik kuchi orasidagi burchakni o'zgarishi orqali Python dasturida bog'liqlik grafigi tuzildi. Burchak a_f – o'zgarishi ishqalanish koefitsentini oshishiga sabab bo'lmoqda. Chiziq o'suvchi parabola ekanligini inobatga olgan holda samarador qiymati 30° ga erishganida qoplamanı konstruktiv jihatdan o'zgartirishga ehtiyoj sezilmoqda.

Sharli tegirmon qoplamlari uchun ilashish koeffitsientini aniqlashning matematik modelini ishlab chiqish uchun avvalambor tegirmondagi qoplama va yuk oqimlari orasidagi umumiy ishqalanish koeffitsiyentini aniqlash zarur bo'ladi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$\sum F_{ish} = \sum N \cdot f; \quad f = \frac{\sum F_{ish}}{\sum N} \quad (8)$$

Qoplamalarga yuk oqimlarini ishqalanishi hamda qoplama sirtlariga kelib urilishi natijasida tegirmon barabani harakatiga qo'shimcha inertsiya kuchlari hosil bo'lishiga sabab bo'ladi va hosil bo'lgan inertsiya kuchlari quyidagicha ifodalandi:

$$\vec{a} = \vec{a}_N + \vec{a}_T; \quad a_N = \frac{v^2}{R}; \quad a_T = \varepsilon \cdot R \quad (9)$$

bu yerda, v – barabanning aylanish tezligi, m/s; R – baraban radiusi, mm; ε – burchak tezlanishi, rad/s².

Barabanning normal aylanish tezlanishini burchak tezlanishiga bog'liqlik holda quyidagicha ifodalaymiz:

$$a_N = \frac{\omega^2 \cdot R^2}{R} = \omega^2 \cdot R \quad (10)$$

bu yerda, ω – barabanning burchak tezlanishi, rad/s².

Bunda to'la tezlanishni quyidagicha bog'liqlik ushbu funksiya bilan tafsiflaniladi:

$$a = f_1(R, \omega, \varepsilon) \quad (11)$$

Burchak tezlanish $\omega = \frac{2\pi n}{T}$ baraban aylanish chastotasiga bog'liq holda o'zgaradi. Agar $n \neq \text{const}$ shart kiritsak, $\varepsilon \neq 0$ shart qabul qiladi.

Sharli tegirmon barabanida yuk oqimlari va qoplama orasidagi barcha kuchlar vektori quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\sum F = \vec{F}_{ish} + N + \vec{F}_N + \vec{F}_T + \vec{G} = m\vec{a} \quad (12)$$

Sharli tegirmon markaziga nisbatan barcha kuchlarning momenti esa quyidagicha ifodalaniladi:

$$\sum M = M_{ish} + M_N + M_n + M_T + M_G = I \cdot \varepsilon \quad (13)$$

Yedirilish miqdorini aniqlash uchun qoplama yuzasi bilan qoplama ko'targichlarini ilashish koeffitsiyentini bog'liqligi Archard tenglamasi yordamida funksiya ko'rinishda ifodalanadi:

$$W = f_4(K, F_N, v, t, H) \quad W = K \cdot \frac{F_N \cdot v \cdot t}{H} \quad (14)$$

Tegirmon barabanidagi yuk oqimining harakatida sirt ishqalanishini tashqi va ichki harorat bilan bog'liqligi quyidagi formula orqali ifodalanadi:

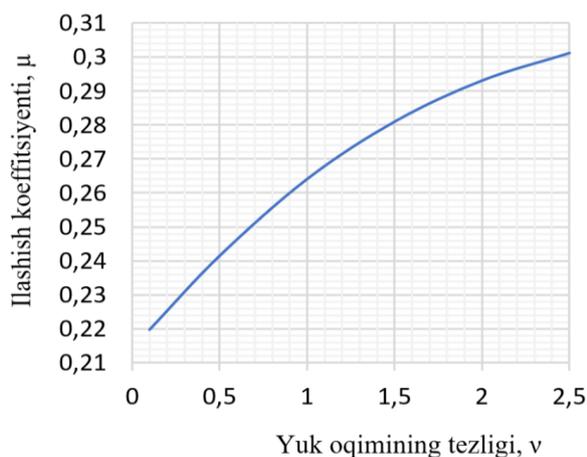
$$W = K \cdot \frac{F_N \cdot v^m \cdot t^n}{H \cdot T^q} \quad (15)$$

bu yerda, m, n, q – emperik koeffitsiyentlardir; T – qoplama va yuk oqimlari urilishi va ishqalanishi orqali yuzaga keladigan harorat;

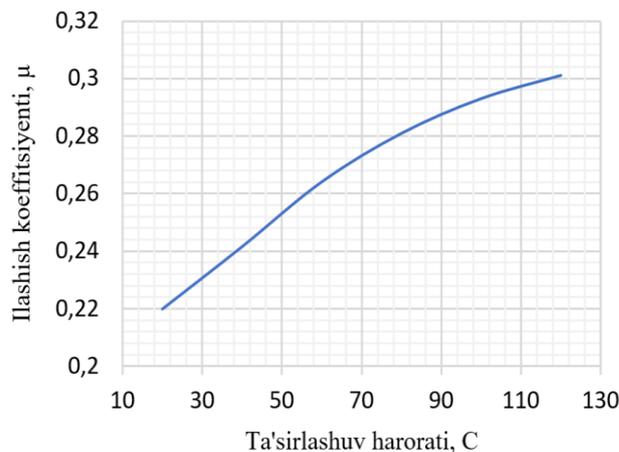
Ilashish koeffitsiyentining nazariy modelini quyidagi funksiya orqali ifodalanadi:

$$\mu = \mu_0 + a \cdot v^b - c \cdot T^d; \quad \mu = f_5(v, T) \quad (16)$$

bu yerda, μ_0 – boshlang'ich ilashish koeffitsiyenti; v – yuk oqimining tezligi; a, b, n, m – emperik koeffitsiyentlar.



2-rasm. Sharli tegirmon qoplamalar ishqalanish koeffitsiyentining yuk oqimining tezligiga bog‘liqlik grafigi



3-rasm. Sharli tegirmon qoplamalar ishqalanish koeffitsiyentining qoplama va yuk oqimlari urilishi va ishqalanishi orqali yuzaga keladigan haroratiga bog‘liqlik grafigi

2-rasmdagi bog‘liqlikdan ko‘rishimiz mumkin bo‘ladiki, yuk oqimining tezligi oshgani sari ilashish koeffitsiyenti ham chiziqli ravishda ortib bormoqda. Ushbu o‘‘sish, yuqori tezlikda harakatlanuvchi zarrachalarning qoplama sirtiga kuchliroq ta’sir ko‘rsatishi, natijada kontakt zonada kuchliroq ishqalanish va ilashuv yuzaga kelishi bilan izohlanadi. Yuk oqimining tezligi – ilashish koeffitsiyentiga muhim ta’sir ko‘rsatuvchi omil hisoblanib, yuqori tezliklarda ilashuv ortadi, bu esa qoplamaning yedirilish jarayoniga bevosita ta’sir qiladi va modelni optimallashtirishda yuk tezligi parametriga alohida e’tibor qaratish maqsadga muvofiq bo‘lib hisoblanadi.

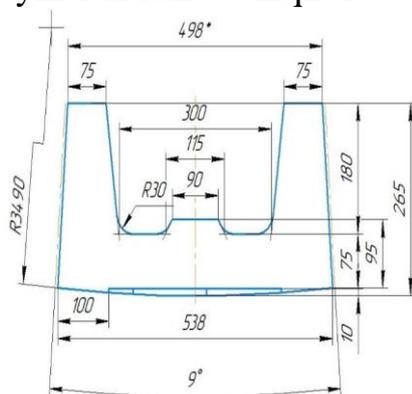
Yuqoridagi 3-rasmda keltirilgan bog‘liqlik tahlili natijalariga ko‘ra, harorat oshishi bilan ilashish koeffitsiyentining qiymati ham muntazam ortib bormoqda. Bundan tashqari harorat ortishi materiallar orasidagi ishqalanish darajasining ortishiga olib keladi. Ushbu holat yuqori haroratli ish sharoitlarida mexanik tizimlarning samaradorligi va eskirishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Demak, ilashish koeffitsiyentining haroratga bog‘liqligini hisobga olish sharli tegirmon himoya qoplamalarini loyihalash va ekspluatatsiya qilishda muhim omillardan biri bo‘lib sanladi.

Dissertatsiyaning «**Sharli tegirmon qoplamalarining konstruksiyasini takomillashtirish asosida ularning ekspluatatsion ko‘rsatkichlarini oshirish**» deb nomlangan uchinchi bobida sharli tegirmon qoplamalarining ekspluatatsiya jarayonidagi ko‘rsatkichlari holatining tadqiqoti, sharli tegirmon barabani silindr qismi qoplamalarining yangi konstruksiyasialari ishlab chiqilgan, sharli tegirmon barabani silindr qismi tuynuk (lyuk) laridagi qoplamalarining yangi konstruksiyasialari ishlab chiqilgan, sharli tegirmonda ekspluatatsiya qilinadigan bazaviy va takomillashtirilgan qoplamalarni yedirilishini «Rocky DEM» Particle Simulator dasturida tadqiq qilindi.

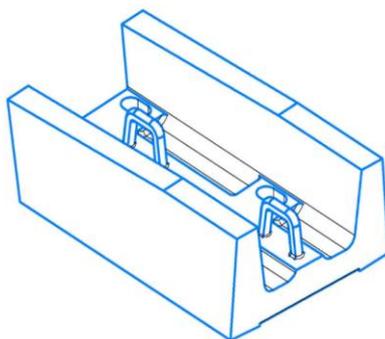
Gidrometallurgiya zavodlarida ekspluatatsiya qilinayotgan MMS tipidagi tegirmonlarning baraban qoplama elementlari holatini tahlil qilish natijalari shuni ko‘rsatmoqdaki, qoplama elementlarining umumiy nosozliklari orasida mexanik sinish va baraban devoridan uzilish holatlari 16 % ni, abraziv yedirilish natijasidagi eskirish esa 84 % ni tashkil etishi aniqlandi.

Yuqoridagi nosozliklarni bartaraf etish maqsadida nazariy tadqiqotlar va ishlab chiqarishdagi qoplamalarning ekspluatatsiyasini kuzatishlar natijasida, qoplama elementlarining tog' jinslari bilan eng ko'p kontakt hosil qiladigan ikki yon tomon ko'targichlarini konstruksiyasiga o'zgartirish kiritish orqali uning ishlash muddatini oshirish zarurligi aniqlandi.

Shu maqsadda bazaviy qoplamalari elentlariga konstruktiv o'zgarishlar kiritib, ularning yedirilishga chidamliligini oshirish evaziga, sharli tegirmonlarining ish rejimi samaradorligini oshirish uchun bir necha takomillashtirilgan turdagi qoplama loyihalari ishlab chiqildi.



a)



b)

a – old tomondan ko‘rinishi va o‘lchamlari; b – umumiy ko‘rinishi.

4-rasm. MMS-7000x2300 tegirmon barabanining silindr qismi uchun 1- takomillashtirilgan qoplamasining umumiy ko‘rinishi va o‘lchamlari

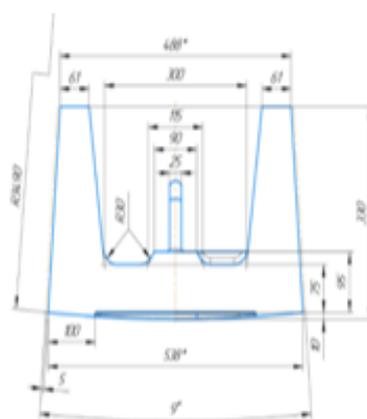
Ishlab chiqilgan 1-texnik yechimda sharli tegirmon barabani silindr qismi standart qoplamalaridan farqli bo‘lgan, ya’ni qoplama o‘rta qismidagi bo‘rtmaning balandligi 165 mm dan 95 mm ga pasaytirilgan va ikki yon tomon ko‘targichlariga nisbatan burchak ostida joylashgan qovurg‘alari olib tashlangan.

1-takomillashtirilgan

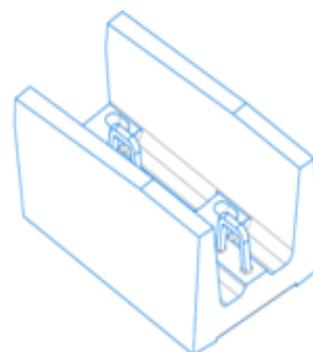
qoplama konstruksiyasi ishlab chiqildi. 1-takomillashtirilgan qoplamaning konstruksiyasi ko‘rinishi va o‘lchamlari 4-rasmda keltirilgan.

Ishlab chiqilgan 2-texnik yechimda MMS sharli tegirmoni barabani qoplamasining yedirilishga chidamliligini va ishlash muddatini oshirish maqsadida 5 – rasmda keltirilgan tegirmon barabanining silindr qismi qoplamalarining 2-takomillashtirilgan konstruksiyasi ishlab chiqildi.

2-takomillashtirilgan qoplamalarning tayyorlanish jarayonida plita qismi ustida joylashgan ikki yon tomon ko‘targichlarining balandligini 265 mm dan 330 mm ga ko‘tarish bo‘yicha takliflar ishlab chiqildi.



a)

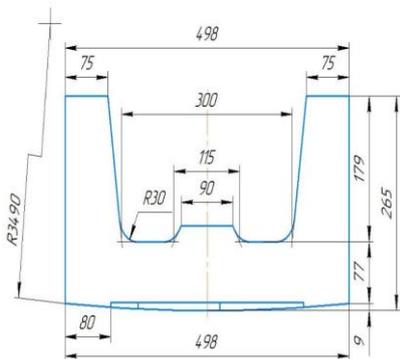


b)

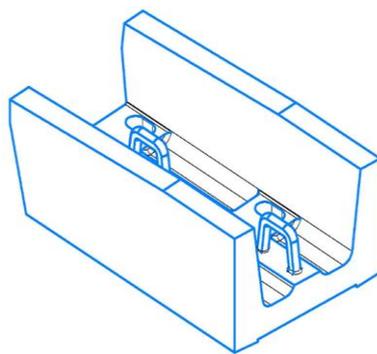
a – old tomondan ko‘rinishi va o‘lchamlari; b – umumiy ko‘rinishi.

5-rasm. MMS-7000x2300 tegirmon barabanining silindr qismi uchun 2-takomillashtirilgan qoplamasining umumiy ko‘rinishi va o‘lchamlari

Tegirmon barabanning silindr qismidagi tuynuk (lyuk) lari qoplamalari baraban silindr qismiga oʻrnatiladigan qoplamalar bilan konstruktiv jihatdan bir xil boʻladi. 1-takomillashtirilgan qoplama konstruksiyasi bazaviy qoplamalardan aynan markaziy boʻrtmaning oʻlchamlari va qovurgʻalarning olib tashlanishi va ogʻirligi 488 kg ni tashkil etishi bilan farq qiladi hamda novsimon shaklga ega.



a)



b)

a – old tomondan koʻrinishi va oʻlchamlari; b – umumiy koʻrinishi.

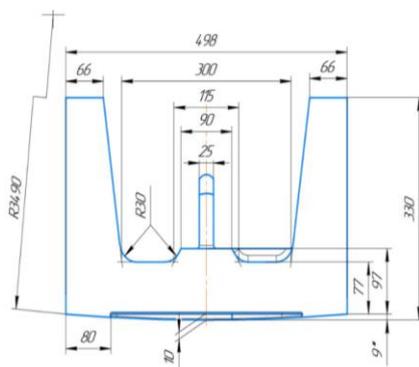
6-rasm. MMS-7000x2300 tegirmon barabanining silindr qismi tuynuk (lyuk) lari uchun 1-takomillashtirilgan qoplamasining umumiy koʻrinishi va oʻlchamlari

Takomillashtirilgan qoplamalarning konstruktiv koʻrinishi va asosiy oʻlchamlari 6-rasmda koʻrsatilgan.

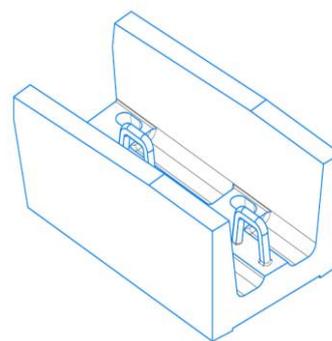
Ishlab chiqilgan texnik yechimda MMS sharli tegirmoni barabani qoplamasining yedirilishga chidamliligini va ishlash muddatini oshirish maqsadida baraban silindr qismi tuynuk (lyuk)lari uchun 2-takomillashtirilgan qoplama konstruksiyasi ishlab chiqildi va uning

koʻrinishi 7 – rasmda keltirilgan. Tegirmon barabani silindr qismi tuynuk (lyuk)lari uchun ishlab chiqilgan 2-takomillashtirilgan qoplamalar koʻtargichlarining balandligini 265 mm dan 330 mm ni ogʻirligi esa 525 kg ni tashkil qiladi.

Baraban harakatida uning silindr qismi qoplamalariga yanchuvchi vositalar va rudalarning taʼsir kuchini, ularning qoplama bilan aloqasini aniqlash uchun raqamli modellashtirish usuli sifatida DEM hamda donador zarrachalarning harakat qonunlari va mexanik xususiyatlarini tahlil qilish uchun esa Nyutonning ikkinchi qonuni foydalanildi. Bundan tashqari ruda va sharlar bir-biri bilan oʻzaro toʻqnashuvini aniq tasvirini taʼminlash hamda modelidan foydalanamiz.



a)



b)

a – old tomondan koʻrinishi va oʻlchamlari; b – umumiy koʻrinishi.

7-rasm. MMS-7000x2300 tegirmon barabanining silindr qismi tuynuk (lyuk) lari uchun 2-takomillashtirilgan qoplamasining umumiy koʻrinishi va oʻlchamlari

modellashtirishda Hertz–Mindlin (sirpanishsiz) aloqa

Nyutonning ikkinchi qonuniga ko‘ra, matematik modellashtirishda har qanday i zarracha uchun harakat tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = -u_{r,ij} F_{ij} R_i \frac{w_i}{|w_i|} + \sum_j R_i \times F_{t,ij} = \sum M \quad (17)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_j (F_{n,ij} + F_{t,ij}) = \sum F \quad (18)$$

bu yerda, I_i – inertsia momenti; w_i – burchak tezligi; m_i – yuk oqimi massa; R_i – baraban radiusi; $F_{n,ij}$ va $F_{t,ij}$ – mos ravishda i va j zarralari orasidagi normal va tangensial kuchlardir. $u_{r,ij}$ – i va j zarralari orasidagi siljish paytida ishqalanish koeffitsienti; g – erkin tushish tezlashishi; t – vaqt; $\sum M$ va $\sum F$ – mos ravishda i zarrachaning hosil bo‘lgan momenti va hosil bo‘lgan kuchidir.

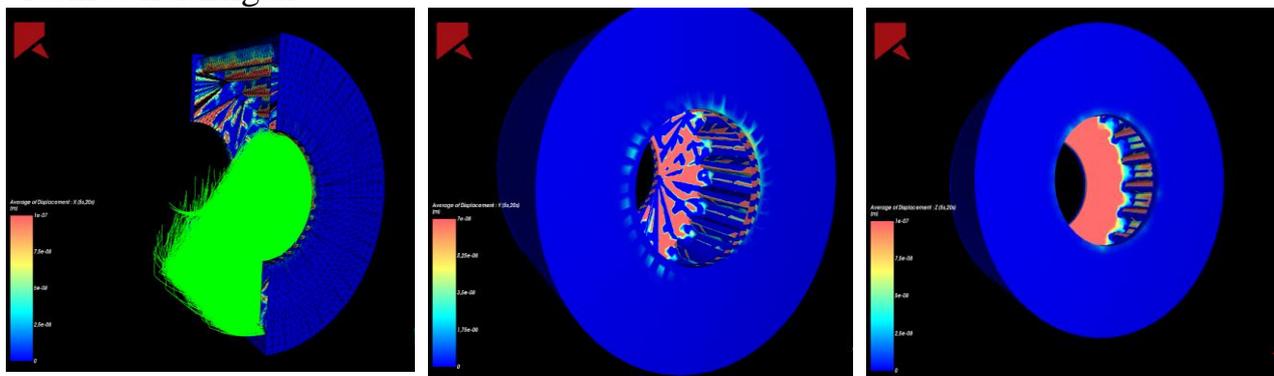
Tadqiqot uchun sharli tegirmon barabani qoplamalarining yedirilish jarayonini modellashtirish uchun diskret elementlarga ega Rocky DEM dasturidan foydalanadi.

Rocky DEM dasturiy ta‘minotida Archardning yedirilish qonuni asosida qoplama yuzasida yuzaga keladigan yedirilish jarayoni bosqichma-bosqich ko‘rib chiqildi:

$$\Delta V = C \Delta W_\tau \quad (19)$$

bu yerda, ΔV – tadqiqot o‘tkaziladigan vaqt oralig‘ida yemirilgan material hajm miqdori; ΔW_τ – tadqiqot o‘tkaziladigan vaqt oralig‘ida yuk oqimini sirt bilan to‘qnashganda zarralar tomonidan bajariladigan tangensial yoki siljish ishi; C – koeffitsient, $C = k/H$.

Qoplamalardagi yedirilishlarni Rocky DEM dasturiy ta‘minoti orqali tahlili 8-rasmda keltirilgan.

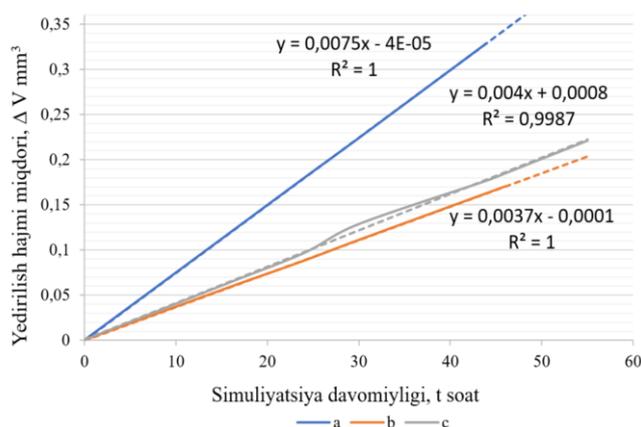


8-rasm. MMS tegirmon barabani qoplamalarining yedirilishi

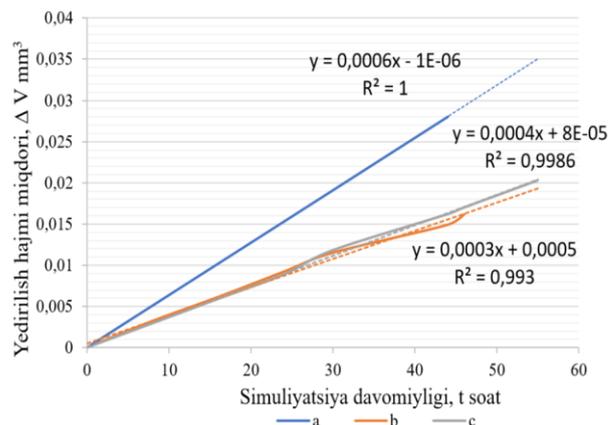
Yuqorida keltirilgan bosqichlar asosida ROCKY DEM Particle Simulator dasturida olib borilgan tadqiqotlar jarayonida sharli tegirmon silindr qismi uchun qo‘llaniladigan bazaviy himoya qoplama, hamda takomillashtirib ishlab chiqilgan 1 va 2-takomillashtirilgan himoya qoplamalari uchun simulyatsiya jarayonidagi yedirilish hajmi miqdoriga bog‘liqligi qiymatlari aniqlandi. Ushbu aniqlangan natijalar asosida ROCKY DEM Particle Simulator dasturida silindr qismiga mo‘ljallangan turli xil qoplamalar uchun quyidagi 9 va 10-rasmda simulyatsiya davomiyligining yedirilish miqdoriga bog‘liqlik grafigi o‘rnatildi.

9 va 10-rasmda keltirilgan solishtirma bog‘liqlik grafigidan ko‘rinadiki simulyatsiya jarayonida silindr qismi va silindr qismida tuynuk (lyuk) qismiga mo‘ljallangan turli xil qoplamalarning yerimilish miqdori qiymatlari natijalari har 8 soatda qayd etib borildi. Simulyatsiya jarayonida bazaviy himoya qoplamalarining ruxsat etilgan yedirilish miqdorigacha bo‘lgan umumiy davomiyligi esa 44 soat ekanligi, 1-takomillashtirilgan qoplamalarning ruxsat etilgan yedirilish miqdorigacha

bo'lgan umumiy davomiyligi 46 soat, 2-takomillashtirilgan qoplamalarda esa 48 soat ekanligi hamda 2-takomillashtirilgan qoplamalar bazaviy qoplamalardan 20 % va 1-takomillashtirilgan qoplamalardan esa 16,4 % ga ish qobilyati yuqori ekanligi aniqlandi.



9-rasm. ROCKY DEM Particle Simulator dasturida tegirmon barabani silindr qismiga mo'ljallangan turli xil qoplamalar yedirilish hajmi miqdorini simulyatsiya davomiyligi uchun solishtirma bog'liqlik grafigi



10-rasm. ROCKY DEM Particle Simulator dasturida silindr qismi tuynuk (lyuk) qismiga mo'ljallangan turli xil qoplamalar yedirilish hajmi miqdorini simulyatsiya davomiyligi uchun solishtirma bog'liqlik grafigi

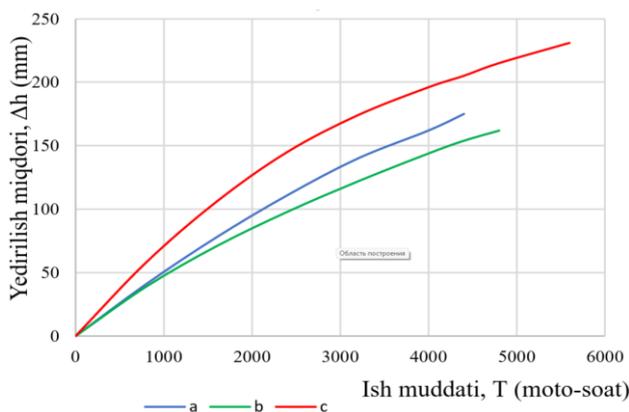
a – bazaviy; b – 1-takomillashtirilgan; c – 2-takomillashtirilgan qoplama

Dissertatsiyaning «**Sharli tegirmon qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarini tajriba-sinov tadqiqot metodikasi va natijalari**» deb nomlangan to'rtinchi bobida sharli tegirmon barabani silindr qismi qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarining samardorligini aniqlash bo'yicha tajriba-sinov tadqiqoti, sharli tegirmon barabani silindr qismi tuynuklari qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarining samardorligini aniqlash bo'yicha tajriba-sinov tadqiqotlari va metodikasini ishlab chiqish, takomillashtirilgan qoplamalarining yedirilish miqdori va ilashish koefitsiyentlarini aniqlash imkonini beruvchi matematik modellarni ishlab chiqish, taklif etilayotgan texnik yechimlarni texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarini baholash keltirilgan.

Takomillashtirilgan konstruksiyasiga ega qoplamalarning samardorligini tajriba-sinov tadqiqotini quyidagi bosqichlarda o'tkazish ko'zda tutilgan:

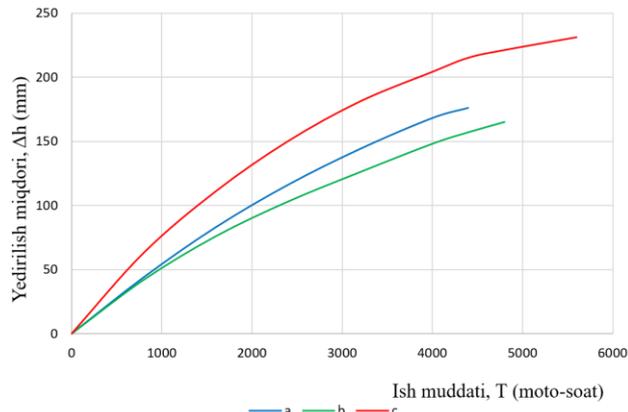
Tajriba-sinov ishlari davomida barcha bazaviy va takomillashtirilgan qoplama elementlari har 800 moto-soat ishlaganida ularning o'rtacha qalinligining yedirilish ko'rsatkichlari bo'yicha aniqlandi.

Tajriba-sinovlar natijasida 1-takomillashtirilgan qoplamalarda ko'targichlar yedirilishi dastlabki 0–1600 moto-soatda 34–42 mm ni tashkil etib, keyingi 1600–4800 moto-soatda 21–22 mm gacha kamaygani va maksimal ishlash muddati 4800 moto-soat ekanligi aniqlandi. 2-takomillashtirilgan qoplamalarda esa 0–1600 moto-soatda yedirilish 48–63 mm, keyingi 1600–5600 moto-soatda 15–16 mm gacha kamaygani hamda ruxsat etilgan maksimal ishlash muddati 5600 moto-soat ekani belgilandi. Tajriba-sinov natijalarining bog'liqlik grafigi 11 – rasmda keltirilgan.



a – bazaviy; b – 1-takomillashtirilgan; c – 2-takomillashtirilgan qoplamalar

11-rasm. Tegirmon barabani silindr qismi bazaviy va takomillashtirilgan qoplamalarining yedirilishining ishlatilish muddatiga bog‘liqlik grafigi



12-rasm. Tegirmon barabani silindr qismi tuynuklari bazaviy va takomillashtirilgan qoplamalarining yedirilishining ishlatilish muddatiga bog‘liqlik grafigi

Tegirmon barabani silindr qismi tuynuklaridagi qoplamalar baraban silindr qismidagi qoplamalari singari uch bosqichda, ya’ni, bazaviy, 1-takomillashtirilgan hamda 2-takomillashtirilgan qoplamalar uchun tajriba-sinov tadqiqotlari olib borildi. Olib borilgan tajriba-sinov natijalariga asosan qoplamalarning ish muddatining ko‘targichlar bo‘yicha yedirilish miqdoriga bog‘liqlik grafigi 12 – rasmda keltirilgan.

Olib borilgan ilmiy-tadqiqot ishlari va amaliy tajriba-sinov natijalari shuni ko‘rsatadiki, tegirmon barabanining silindr qismi tuynuklariga o‘rnatilgan 2-takomillashtirilgan qoplama konstruksiyasi yuqori yemirishga chidamliligi bilan ajralib turadi.

Yuqoridagi omillarni kompleks hisobga olgan holda, takomillashtirilgan qoplama uchun kuchaytirilgan (real) ilashuv koeffitsiyenti quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$\mu = (\mu_0 + \alpha \cdot v^n - b \cdot T^m) \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{\tan(\alpha_f)}{R_b}\right) \quad (20)$$

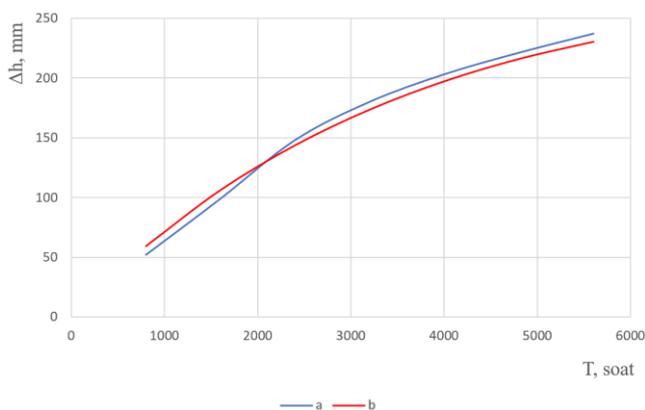
bu yerda, μ – umumiy (effektiv) ilashuv koeffitsiyenti; μ_0 – statik holatdagi ishqalanish (ilashuv) koeffitsiyenti; a – tezlikka sezuvchanlik koeffitsiyenti (empirik aniqlanadi); v – kontakt yuzalar orasidagi nisbiy sirpanish tezligi; n – harakatga bog‘liqlik darajasi ($0 < n < 1$); b – haroratga sezuvchanlik koeffitsiyenti; T – kontakt zonadagi harorat (Kelvin); m – haroratga bog‘liqlik darajasi (odatda $m \approx 1$); γ – geometriyaga bog‘liq empirik tuzatuvchi koeffitsiyent (profil shakliga xos); α_f – kontakt zonadagi ishqalanish (egilish) burchagi; R_b – qoplama profilining bo‘rtma radiusi. $(\mu_0 + \alpha \cdot v^n - b \cdot T^m)$ – tribologik model (tezlik va harorat ta’siri); $\left(1 + \gamma \cdot \frac{\tan(\alpha_f)}{R_b}\right)$ – geometrik model (egri sirt ta’siri).

Tegirmonning takomillashtirilgan qoplamasining yedirilish miqdori umumlashtirilgan yakuniy matematik model orqali aniqlanadi:

$$W = \frac{[\mu_0 + \alpha v^n - b T^m] \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{\tan(\alpha_f)}{R_b}\right) \cdot P \cdot v \cdot t}{H_0 - \lambda T} \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{A_{lokal}}{A_p}\right) \quad (21)$$

bu yerda, P – kontakt bosimi, (agar kontakt yuzasi A bir xil bo‘lsa, $P = F_N/A$); H_0 – dastlabki (normal haroratdagi) qattiqlik; λ – haroratga bog‘liq sezuvchanlik koeffitsiyenti; β – tajriba orqali aniqlanadigan tuzatuvchi koeffitsiyent; A_{lokal} – kuch

bevosita tushgan mahalliy zona maydoni (masalan, bo‘rtma tepalari); A_p – umumiy kontakt profili yuzasi;



a – tajriba-sinovida aniqlangan vaqt davomida qoplamaning yedirilish miqdorlari;
 b – ishlab chiqilgan matematik model natijalarida aniqlangan vaqt davomida qoplamaning yedirilish miqdorlari
13-rasm. Tajriba-sinov natijalari va ishlab chiqilgan matematik model yordamida aniqlangan vaqt davomida qoplamaning yedirilish miqdorlari aniqlilik darajalarini ko‘rsatuvchi bog‘liqlik

Yuqoridagi 13-rasmda keltirilgan nisbiy xatoliklar xar 800 motosoatda 7,2 dan 13,8 gacha va ularning o‘rtacha qiymati (aniqlilik darajasi) 5.1% ekanligi aniqlandi. Ushbu tadqiqot davomida o‘zaro farqlar 4,42-7,17 mm oralig‘ida, nisbiy xatolik esa 1 % bo‘lib yuqori aniqlilikni ifodalaydi va ushbu matematik modeldan amaliy foydalanish mumkinligini ko‘rsatadi. Bundan tashqari ishlab chiqilgan matematik model asosida har qanday yangi konstruksiyali qoplamalarning ish muddatini prognozlash imkoni mavjud bo‘lib, bu texnologik rejimni optimallashtirish, amaliy foydalanishda xizmat muddatini prognoz qilish, texnik xizmat ko‘rsatish intervalini aniqlash uchun asos bo‘ladi.

MMS-7000x2300 tegirmoniga taklif etilayotgan 2-takomillashtirilgan qoplamalarni o‘rnatish orqali, uning og‘irligi bazaviy qoplamalar o‘rnatilgandagiga nisbatan 7562 kgga kamaydi. Buning natijasida esa barabanni to‘ldirish koeffitsiyenti φ ortdi. Ya’ni, qoplama tayyorlanadigan 110G13L po‘latning zichligi taxminan 7850 kg/m³ ni tashkil etib, yanchiladigan tog‘ jinsini granit deb hisoblasak, tegirmon barabaniga soatiga qo‘shamcha 2553 kg ortiqcha tog‘ jinsi solinadigan bo‘ldi.

Ishlab chiqilgan yangi konstruksiyadagi qoplamalarni MMS-7000x2300 rusumli tegirmonlarda joriy qilish natijasida taklif etilayotgan takomillashtirilgan yangi konstruksiyadagi tegirmon barabanining silindrsimon qismi qoplamalari avvalgi qo‘llanilgan qoplamalarga nisbatan yedirilishga chidamliligi 25 % ga yuqori bo‘lishiga erishildi.

Shuningdek, tegirmon barabanining silindrsimon qismidagi tuynuk (lyuk) laridagi qoplamalarining yangi konstruksiyasini MMS-7000x2300 rusumli tegirmonlarda joriy qilish natijasida ham qoplamalarning yedirilishga chidamliligi 25 % ga oshdi.

Shunday qilib, taklif etilayotgan ishlanmalarni “Navoiy kon-metallurgiya kombinati” AJ ning 2-gidrometallurgiya zavodida qo‘llaniladigan MMS-7000x2300 rusumli tegirmonlarda joriy etish natijasida, har bir tegirmonning to‘xtalishlar vaqtini yiliga 2-3 % hamda qoplamalarga bo‘lgan ehtiyojni 22% ga kamayishiga erishildi.

Sharli tegirmon barabanining silindr qismi hamda silindr qismidagi tuynuklari uchun taklif etilayotgan takomillashtirilgan qoplamalarni qo‘llash orqali bitta tegirmon uchun bir yildagi ekspluatatsion xarajatlar samaradorligini quyidagicha aniqlaymiz:

$$E_T = E_{T_2} + E_{T_2.tuynuk} = 657700 + 39484 = 697184 \text{ ming so‘m} \quad (22)$$

XULOSA

«Sharli tegirmonlar qoplamalarini konstruksiyasini takomillashtirish asosida ularning ishlash samaradorligini oshirish» mavzusidagi texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarga asoslangan holda, nazariy va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. MMS-7000x2300 tegirmonlarning samaradorligiga salbiy ta'sir qiluvchi omillar aniqlandi va ular quyidagi kattaliklarni tashkil etadi: qoplamalarning eskirishi 52%, elektr qismi nosozligi 17%, tishli uzatma tishining yedirilishi va sinishi 13%, moylash tizimi nosozliklari 8%, yuk oqimining yetishmasligi 7% ni tashkil etadi.

2. Ilashish koeffitsientini aniqlash uchun qoplama geometriyasi, α_f burchagi, to'ldirish koeffitsienti φ va aylanish tezligi ψ omillarini inobatga olgan matematik model ishlab chiqildi hamda u asosida Python tilida dasturiy ta'minot yaratildi.

3. Tegirmon barabanining aylanish tezligi, harorat qiymatlari va himoya qoplamalarining konstruktiv xususiyatlari inobatga olingan holda ishqalanish jarayonlarini tahlil qilish, energiya yo'qotishlarini baholash hamda qoplamalarning yedirilishini prognozlash imkonini beruvchi matematik model ishlab chiqildi hamda ushbu model uchun Python dasturlash tilida uning dasturiy ta'minoti yaratildi.

4. «NGMK» AJ gidrometallurgiya zavodlarida ekspluatatsiya qilinayotgan MMS tipidagi tegirmonlarning baraban qoplama elementlari holatini tahlil qilish natijasida, umumiy nosozliklarning 16 % ini mexanik sinish va baraban devoridan uzilish, 84 % ini esa abraziv yedirilish natijasidagi eskirish tashkil etishi aniqlandi.

5. Sharli tegirmon barabani silindr qismi uchun bazaviy himoya qoplamasi konstruksiyasining ko'ndalang bo'rtma balandligini 165 mm dan 95 mm gacha kamaytirilib, mavjud qovurg'alari olib tashlangan holda, tegirmon qoplamalarining mustahkamligini oshirish imkonini beruvchi birinchi takomillashtirilgan hamda plita qismi ustidagi yon tomon ko'targichlar balandligini 265 mm dan 330 mm gacha oshirish orqali ikkinchi takomillashtirilgan himoya qoplamalari ishlab chiqildi.

6. Tegirmon barabani silindr tuynuk qismi uchun og'irligi 626 kg bo'lgan bazaviy qoplama nisbatan geometrik ko'rsatkichlariga o'zgartirishlar kiritilib, 488 kg va 525 kg og'irlikka ega hamda ish samaradorligi oshirilishi imkonini beradigan birinchi va ikkinchi takomillashtirilgan himoya qoplamalari ishlab chiqildi.

7. ROCKY DEM Particle Simulator dasturida o'tkazilgan tahlillar natijasida ikkinchi takomillashtirilgan himoya qoplamalarning ish qobiliyati bazaviy qoplamalarga nisbatan 20 %, birinchi takomillashtirilgan qoplamalarga nisbatan esa 16,4 % yuqori ekanini aniqlandi.

8. Tajriba-sinov natijalari asosida birinchi takomillashtirilgan qoplamalarning maksimal ekspluatatsion muddati 4800 moto-soat, ikkinchi takomillashtirilgan qoplamalarniki esa 5600 moto-soat ekanligi aniqlandi. Bu esa ikkinchi takomillashtirilgan qoplamalarning xizmat muddati bazaviy himoya qoplamalariga nisbatan 20-25% ga yuqoriligi aniqlandi.

9. Tog' jinslari va sharlar bilan o'zaro ta'sir jarayonida himoya qoplamalarining hajmiy yedirilishini ilashish koeffitsiyenti orqali aniqlash imkonini beruvchi

matematik model ishlab chiqildi va bu asosida C++ tilida modelning dasturiy ta'minoti yaratildi.

10. Sharli tegirmon barabanining silindr qismi va undagi tuynuklar uchun taklif etilgan takomillashtirilgan qoplamalarni qo'llash natijasida bir tegirmon uchun yillik iqtisodiy samaradorlik 697 184 ming so'mni tashkil etdi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.17/04.06.2021.Т.06.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАВОЙСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

АБДУЛЛАЕВ САРДОР ХУСНИДДИНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ НА
ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИХ ФУТЕРОВОК**

04.00.16 – Горные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам

Навои – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за №B2025.1.PhD/T5277.

Диссертация выполнена в Навоийском государственном горно-технологическом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме) размещен на веб-странице Научного совета по адресу www.ndki.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Абдуазизов Набижон Азаматович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Эгамбердиев Илхом Пулатович**
доктор технических наук (DSc), профессор

Райхонов Шухрат Зарипович
доктор философии (PhD) по техническим наукам

Ведущая организация: **АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»**

Защита диссертации состоится 28 ноября 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.17/04.06.2021.T.06.02. Адрес: 210100, г. Навои, ул. Галаба шох, 76в. Зал заседаний Навоийского государственного горно-технологического университета. Тел.: (79) 223-04-40; факс: (79) 223-49-66; E-mail: info@nsmut.uz, nsmi@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Навоийского государственного горно-технологического университета (зарегистрирован за № 236). Адрес: 210100, г. Навои, ул. Галаба Шох, дом-76в. Тел.: (79) 223-04-40; факс: (79) 223-49-66.

Автореферат диссертации разослан «13» ноября 2025 г.
(реестр протокола рассылки № 161 от «13» ноября 2025 г.).



И.Т.Мислибаев

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

Р.У.Джураев

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

А.Б.Тухташев

Заместитель председателя научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире для интенсификации процессов переработки добываемых полезных ископаемых требуется повышение эффективности обогатительных предприятий за счёт применения усовершенствованного измельчительного оборудования. Практика показывает, что 52% всех неплановых остановок шаровых мельниц обусловлены износом футеровок. Постоянное трение, давление и удары со стороны горных пород и шаров вызывают износ футеровок барабана мельницы, что остаётся одной из актуальных проблем, резко снижающих производственную эффективность. Вопросы, связанные с продлением срока службы шаровых мельниц за счёт повышения надёжности их рабочих элементов и снижения эксплуатационных затрат, остаются актуальными и по сей день, и их решение имеет важное значение.

На сегодняшний день в мире при измельчении горных пород в шаровых мельницах ведутся научные исследования, направленные на повышение их эффективности за счёт правильного выбора режима работы, теоретического изучения взаимодействия футеровок мельницы с рудой и металлическими шарами в процессе измельчения, разработки новых конструкций футеровок, устойчивых к износу, а также повышения эффективности защитных покрытий барабана мельницы. В этом направлении особое внимание уделяется созданию усовершенствованных конструкций защитных футеровок шаровых мельниц, что способствует повышению их эксплуатационной эффективности.

В Республике достигнут ряд научно-практических результатов по ускорению добычи полезных ископаемых, изучению эффективных методов, повышающих показатели их переработки и обогащения, а также внедрению научно обоснованных мер по повышению эффективности работы шаровых мельниц. В Указе Президента Республики Узбекистан¹ определены важные задачи по: «дальнейшей модернизации и диверсификации промышленности путем перевода ее на качественно новый уровень, направленных на опережающее развитие высокотехнологичных отраслей, освоению принципиально новых видов технологий, сокращению энергоемкости и ресурсоемкости, широкому внедрению в производство энергосберегающих технологий ...». В связи с этим, большое научное и практическое значение имеет повышение производительности шаровых мельниц, ресурсосбережение их рабочих элементов, а также снижение себестоимости изготовления футеровок мельниц.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 г. «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы», №УП-4707 от 4 марта 2015 г. «О программе мер по обеспечению структурных преобразований, модернизации и

¹ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 г. «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

диверсификации производства в 2015-2019 гг.» и Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-4124 от 17 января 2019 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности предприятий горно-металлургической отрасли», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики: VII. «Науки о земле (геология, геофизика, сейсмология и переработка минерального сырья)».

Степень изученности проблемы. Большой вклад в развитие теории и практики повышения эффективности шаровых мельниц внесли Крюков Д.К., Андреев С.Е., Богданов В.С., Вердиян М.А., Дашко Ю.И., Неронов Н.П., Олевский В.А., Павэлл М.С., Андреев Е.Е., Маляров П.В., Перов В.А., Дун И.Ф., Пенкин Н.С., Санакулов К.С., Эгамбердиев И.П. и др. учёные с научно-практическим подходом к повышению эффективности процесса измельчения в шаровых мельницах и снижению скорости износа материалов футеровки. Однако на сегодняшний день до конца не изучены проблемы повышения эффективности измельчительных процессов на основе разработки усовершенствованных, износостойких конструкций футеровок, устанавливаемых на цилиндрическую часть шаровых мельниц и люков в цилиндрической части.

В связи с этим возникает необходимость разработки ресурсосберегающих конструкций футеровок шаровых мельниц, а также моделирования динамических процессов взаимодействия между футеровками шаровой мельницы, шарами и горными породами в процессе измельчения и исследования процессов их износа, имеющих важное значение для горнодобывающей отрасли и требующих продолжения дальнейших исследований в этом направлении.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Навоийского государственного горно-технологического университета рамках хозяйственного договора №01-01/26 на тему «Разработка и продление срока службы бронированных сплавов с обновленным составом дробильно-измельчающего горного оборудования» (2023-2024 гг.).

Целью исследования является повышение эксплуатационной эффективности шаровых мельниц на основе разработки усовершенствованных конструкций защитных футеровок.

Задачи исследования:

анализ современного состояния и определение основных направлений повышения ресурса футеровки шаровых мельниц и эффективности показателей измельчения;

теоретическое исследование взаимодействия футеровки мельницы с

металлическими шарами и горной породой в процессе измельчения;

разработка математической модели, позволяющей рассчитывать степень износа усовершенствованных футеровок и их коэффициент сцепления, а также определение коэффициента сцепления для футеровок шаровых мельниц;

разработка усовершенствованных конструкций износостойких футеровок, цилиндрической части и конструкций футеровок для люка шаровых мельниц;

моделирование динамических процессов взаимодействия между футеровками шаровых мельниц, шарами и горными породами в процессе измельчения, а также анализ процессов их износа.

Объектом исследования являются защитные элементы цилиндрической части барабана шаровой мельницы и люки цилиндрической части.

Предметом исследования является износостойкость и надёжность футеровок шаровой мельницы, основанные на разработке их усовершенствованных конструкций.

Методы исследования. В процессе исследования использованы теоретические и экспериментальные методы повышения эксплуатационной эффективности шаровых мельниц на основе разработки усовершенствованных конструкций их защитных футеровок, а также проведены экспериментальные исследования в промышленных условиях с применением методов математической статистики.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определено изменение величины коэффициента сцепления в футеровках шаровой мельницы, возникающих под действием нормальной реакции, силы тяжести и ударного воздействия на основе значений коэффициентов трения;

установлена взаимосвязь коэффициентов сцепления, формирующихся в результате взаимодействия футеровки с горной породой и стальными шарами с учётом сил сцепления и температурных показателей, возникающих в процессе измельчения горных пород в шаровой мельнице, а также разработана математическая модель, позволяющая их рассчитывать;

усовершенствована конструкция футеровок цилиндрической части барабана шаровой мельницы на основе моделирования динамических процессов взаимодействия между шарами и горными породами;

разработана математическая модель, позволяющая определить объёмный износ футеровок мельницы с учётом геометрических параметров шаровой мельницы и горных пород, коэффициента сцепления, давления, возникающего на контактной поверхности, и твёрдости материала.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана усовершенствованная конструкция футеровки цилиндрической части барабана мельницы, позволяющая снизить износ до 25%;

разработана усовершенствованная конструкция футеровки отверстий цилиндрической части барабана мельницы, позволяющая повысить её износостойкость до 24%;

создано программное обеспечение, обеспечивающее возможность определения степени износа усовершенствованных футеровок.

Достоверность результатов исследования подтверждается промышленными испытаниями, многочисленными теоретическими расчётами, а также количественным и качественным подтверждением основной идеи работы при разработке методов повышения надёжности эксплуатации шаровых мельниц. Кроме того, она обоснована положительными результатами экспериментальных испытаний усовершенствованных футеровок цилиндрической части барабана, способствующих повышению эффективности рабочих режимов шаровых мельниц.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке математической модели, позволяющей рассчитывать взаимосвязь коэффициентов сцепления, формирующихся в результате взаимодействия футеровки с горной породой и стальными шарами с учётом сил сцепления и температурных факторов, возникающих в процессе измельчения горных пород в шаровой мельнице, а также в повышении эффективности работы мельницы за счёт совершенствования конструкции футеровки цилиндрической части барабана.

Практическая значимость результатов исследования заключается в создании программного обеспечения, позволяющего определять объёмный износ футеровок барабана шаровой мельницы, а также в разработке новых конструкций футеровок с повышенной износостойкостью для цилиндрической части барабана и отверстий в ней, что способствует повышению эффективности работы мельниц.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по разработке технических решений повышения эффективности показателей процесса измельчения за счёт совершенствования конструкции футеровок цилиндрической части барабана шаровой мельницы:

футеровка цилиндрической части барабана шаровой мельницы внедрена на гидromеталлургическом заводе №2 АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» (справка АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» №23/01-01-07/220 от 20 марта 2025 г.). В результате износостойкость мельниц MMS-7000x2300 увеличилась на 25% по сравнению с ранее использованными футеровками;

футеровка люка цилиндрической части барабана шаровой мельницы внедрена на гидromеталлургическом заводе №2 АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» (справка АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» №23/01-01-07/220 от 20 марта 2025 г.). В результате износостойкость футеровки люка цилиндрической части барабана мельницы MMS-7000x2300 увеличилась на 25% по сравнению с ранее использованными футеровками.

Апробация результатов исследования. Апробация результатов данного исследования проведена на 3 республиканских и 2 международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы всего 12 научных работ, из них 5 статей в научных изданиях,

рекомендованных для публикации основных научных результатов докторских диссертаций Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 4 статьи в республиканских и 1 статья в зарубежных журналах, получена 1 свидетельство на программное обеспечение для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 118 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и востребованность проведенного исследования, цель и задачи исследования, характеризуются объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, внедрение в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Современное состояние повышения эффективности показателей процессов измельчения шаровых мельниц и анализ научных исследований»** приведены анализ эксплуатационных показателей шаровых мельниц, применяемых при измельчении горных пород, анализ физико-механических свойств горных пород и их влияние на процесс измельчения, исследование негативных факторов, влияющих на ресурс работы шаровых мельниц, анализ состояния научно-исследовательских работ проведенных по теме диссертации, анализ существующих видов футеровки применяемых в шаровых мельницах и перспективы повышения их эффективности, а также основные направления повышения эффективности показателей режима измельчения в шаровых мельницах.

Снижение эффективности шаровых мельниц зависит от нескольких факторов, которые отрицательно влияют на эксплуатационные показатели мельницы. Определено что, 52% из них составляет износ футеровки, 17% неисправность электрической части, 13% износ или поломка зубьев зубчатой передачи, 8% система смазки, 7% отсутствие грузопотока, 3% диаметр и объем шаров.

Чрезмерное возникновение неожиданных простоев в ходе технологических процессов, интенсивный износ или выход из строя рабочих органов, а также недостаточная надежность защитные футеровки внутренней поверхности барабана отрицательно влияют на общую эффективность мельницы.

Таким образом, в целях повышения эффективности работы шаровых мельниц, в следующих основных задачах нашей работы выбрано обеспечение их долговечности за счет разработки новой конструкции усовершенствованных футеровки, защищающих цилиндрическую часть барабана мельницы и люк цилиндрической части, имеющих износостойкость и долговечность.

Во второй главе диссертации «Исследование взаимодействия футеровки мельниц с горными породами и металлическими шарами в процессе измельчения» теоретически проанализированы режимы работы шаровых мельниц и нагрузки, возникающие на их футеровки в процессе измельчения, силы и коэффициенты, влияющие на профиль футеровки, исследована зависимость показателей износа футеровки шаровых мельниц от коэффициента сцепления, разработана математическая модель определения коэффициента сцепления футеровки шаровых мельниц.

Изменение значения коэффициента сцепления может быть достигнуто путем изменения значения коэффициента сцепления с значением коэффициента трения, возникающего при нагрузке горных пород и шаров, а также футеровки, в определенных пределах соотношения значений суммарных тангенциальных и нормальных сил, действующих на поверхность футеровки (формула 1).

$$K_i \sum N \geq \sum T \quad \text{или} \quad K_i \geq \frac{\sum T}{\sum N} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} \quad (1)$$

где, K_i – коэффициент сцепления; $\sum N$ – сумма нормальных сил; $\sum T$ – сумма тангенциальных сил.

При определении коэффициента сцепления K_i угол между центростремительной силой и тангенциальной силой определяется следующим образом:

$$\alpha_f + \lambda_x = 90; \quad \Rightarrow \quad \lambda_x = 90 - \alpha_f \quad (2)$$

Для определения сил, действующих на внутренние поверхности барабана мельницы, на основе уравнений равновесия в выражении 2 по принципу Даламбера были составлены следующие системные выражения:

$$\begin{cases} \sum F_x = ma_x = T_N \cdot \cos \alpha_f + G \cdot \cos(90 - a_{NG}) - N_N \cdot \cos(90 - a_\alpha) = 0 \\ \sum F_y = ma_y = F_N + N_N \cdot \cos \alpha_f + G \cdot \cos a_{NG} + T_N \cdot \cos \lambda_x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Согласно принципу Даламбера, динамическое выражение преобразуется в статическое, и при этом принимается условие $a_x = 0$, $a_y = 0$.

$$T_N \cdot \cos \lambda_x = |(F_N + N_N + G \cdot \cos a_{NG})|; \quad T_N = \frac{(F_N + N_N \cdot \cos \alpha_f + G \cdot \cos a_{NG})}{\cos \lambda_x} \quad (4)$$

где, $\sum F_x$ – сумма всех сил на оси X; $\sum F_y$ – сумма всех сил на оси Y; a_x – вектор ускорения на оси X; a_y – вектор ускорения на оси Y; G – сила тяжести; N_N – нормальная сила реакции.

Для определения угла между центростремительными, тангенциальными силами и весом потока груза, а также угла между силами реакции была построена следующая функция зависимости.

$$\psi = f_1(a_f, a_{NG}, \lambda_x) \quad (5)$$

С помощью силы нормальной реакции, а также с использованием значений функции, приведенной в выражении 5, определяются следующие зависимости сил и коэффициентов, влияющих на износ футеровки.

$$K_i = \frac{\cos(90 - \alpha_f)}{\cos \alpha_f} - \frac{m_q g \cdot \cos(90 - a_{NG})}{N \cdot \cos \alpha_f} \quad (6)$$

Коэффициент силы, влияющий на износ футеровки, определен путем взаимосвязи следующих переменных, таких как центростремительная сила, угол

между тангенциальной силой и весом потока груза, угол между силой реакции, масса груза и коэффициент трения.

$$K_i = f_2(\psi, m_y, f_s); \quad F_{ish} = N \cdot f = m \cdot g \cdot f_s; \quad K_i = \tan \alpha_f - \frac{m_q}{m_y} \cdot \frac{\cos(90 - a_{NG})}{f_s \cdot \cos \alpha_f} \quad (7)$$

где α_f – угол между нормальной силой и силой реакции; a_{NG} – угол между весом грузопотока и силой реакции; m_q – масса футеровки, кг; m_y – вес грузопотока, кг.

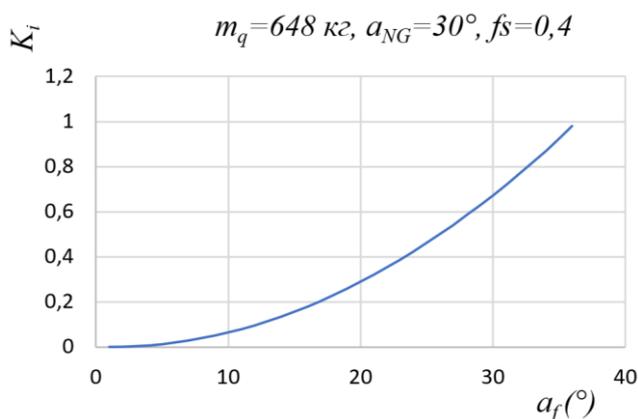


Рис.1. График зависимости коэффициента трения шаровых мельниц от коэффициента сцепления

На рисунке 1 по формуле 7 построен график зависимости в программе Pyhton за счет изменения угла между коэффициентом трения, силой нормальной реакции и силой тяжести. Изменение угла α_f приводит к увеличению коэффициента трения. Учитывая, что линия является возрастающей параболой, когда эффективное значение достигает 30° , возникает необходимость в конструктивном изменении футеровки.

Для разработки математической модели определения коэффициента сцепления для футеровок шаровой мельницы, прежде всего, необходимо определить суммарный коэффициент трения между футеровкой и грузовыми потоками в мельнице, который выражается следующим образом:

$$\sum F_{ish} = \sum N \cdot f; \quad f = \frac{\sum F_{ish}}{\sum N} \quad (8)$$

В результате трения грузовых потоков о покрытия и их столкновения с поверхностями футеровки возникают дополнительные силы инерции при движении барабана мельницы, и возникающие силы инерции выражаются следующим образом:

$$\vec{a} = \vec{a}_N + \vec{a}_T; \quad a_N = \frac{v^2}{R}; \quad a_T = \varepsilon \cdot R \quad (9)$$

где, v – скорость вращения барабана, м/с; R – радиус барабана, мм; ε – угловое ускорение, рад/с².

Выразим ускорение нормального вращения барабана в зависимости от углового ускорения следующим образом:

$$a_N = \frac{\omega^2 \cdot R^2}{R} = \omega^2 \cdot R \quad (10)$$

где ω – угловое ускорение барабана, рад/с².

При этом полная зависимость ускорения описывается следующей функцией:

$$a = f_1(R, \omega, \varepsilon) \quad (11)$$

Угловое ускорение $\omega = \frac{2\pi n}{T}$ изменяется в зависимости от частоты вращения барабана. Если ввести условие $n \neq \text{const}$, принимает условие $\varepsilon \neq 0$.

Вектор суммарных сил между грузовыми потоками и футеровкой в барабане шаровой мельницы определяется следующим выражением:

$$\sum F = \vec{F}_{ish} + N + \vec{F}_N + \vec{F}_T + \vec{G} = m\vec{a} \quad (12)$$

Момент суммарных сил относительно центра шаровой мельницы выражается следующим образом:

$$\sum M = M_{ish} + M_N + M_n + M_T + M_G = I \cdot \varepsilon \quad (13)$$

Зависимость коэффициента сцепления подъемников футеровки с поверхностью футеровки для определения величины износа выражается в виде функции с помощью уравнения Арчарда:

$$W = f_4(K, F_N, v, t, H) \quad W = K \cdot \frac{F_N \cdot v \cdot t}{H} \quad (14)$$

Зависимость поверхностного трения при движении грузового потока в барабане мельницы от внешней и внутренней температуры выражается следующей формулой:

$$W = K \cdot \frac{F_N \cdot v^m \cdot t^n}{H \cdot T^q} \quad (15)$$

где m, n, q – эмпирические коэффициенты; T – температура, создаваемая ударами и трением футеровки и грузовых потоков;

Теоретическая модель коэффициента сцепления выражается следующей функцией

$$\mu = \mu_0 + a \cdot v^b - c \cdot T^d; \quad \mu = f_5(v, T) \quad (16)$$

где, μ_0 – начальный коэффициент сцепления; v – скорость грузопотока; a, b, n, m – эмпирические коэффициенты.

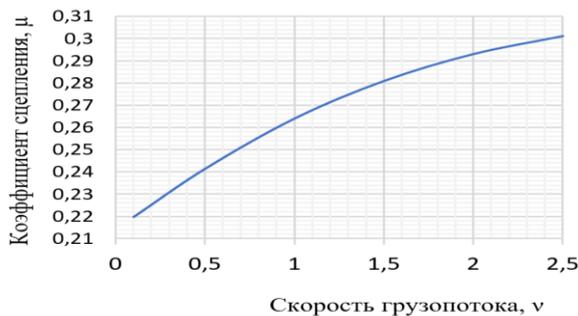


Рис.2. График зависимости коэффициента трения футеровки шаровой мельницы от скорости грузопотока

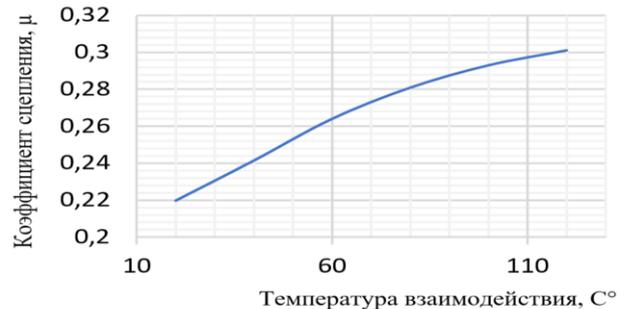


Рис.3. График зависимости коэффициента трения футеровки шаровой мельницы от температуры, создаваемой ударами и трением футеровки и грузовых потоков

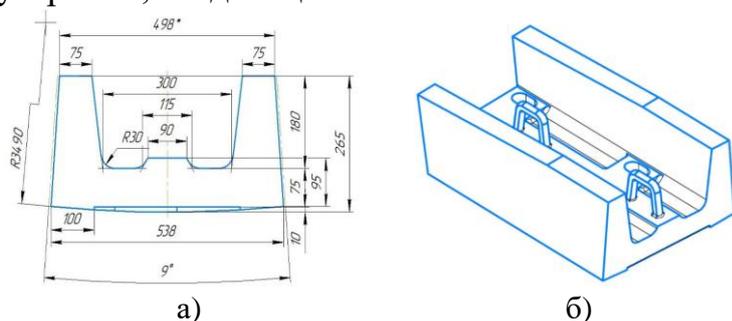
Из зависимости на рис. 2 видно, что по мере увеличения скорости грузопотока линейно увеличивается и коэффициент сцепления. Это увеличение объясняется тем, что частицы, движущиеся с высокой скоростью, оказывают более сильное воздействие на поверхность футеровки, в результате чего в зоне контакта возникает более сильное трение и сцепление. Скорость грузопотока – является важным фактором, влияющим на коэффициент сцепления, при высоких скоростях сцепление увеличивается что напрямую влияет на процесс износа футеровок, и при оптимизации модели целесообразно обратить особое внимание на параметр скорости груза.

Согласно результатам анализа зависимостей, представленным на рисунке 3 выше, значение коэффициента сцепления также постоянно увеличивается с повышением температуры. Кроме того, повышение температуры приводит к увеличению степени трения между материалами. Данное положение может существенно повлиять на эффективность и износ механических систем в условиях высокотемпературной работы. Следовательно, учет температурной зависимости коэффициента сцепления является одним из важных факторов при проектировании и эксплуатации защитных футеровок шаровых мельниц.

В третьей главе диссертации, озаглавленной «Повышение эксплуатационных показателей шаровых мельниц на основе совершенствования конструкции их футеровок» исследовано состояние показателей шаровых мельниц в процессе эксплуатации, разработаны новые конструкции футеровок цилиндрической части барабана шаровой мельницы, разработаны новые конструкции футеровок в люках цилиндрической части барабана шаровой мельницы, исследовано разрушение базовых и усовершенствованных футеровок, эксплуатируемых в шаровой мельнице, в программе Particle Simulator «Rocky DEM».

Результаты анализа состояния футеровки барабанов мельниц типа ММС, эксплуатируемых на гидрометаллургических заводах, показывают, что среди общих неисправностей футеровки механические изломы и обрывы от стенки барабана составляют 16%, а износ в результате абразивного износа - 84%.

В процессе устранения вышеуказанных неисправностей, в результате теоретических исследований и наблюдений за эксплуатацией футеровок в производстве выявлена необходимость увеличения срока их службы за счет внесения изменений в конструкцию двух боковых подъемников элементов футеровки, создающих наибольший контакт с горными породами.



а) – вид спереди и размеры; б) – общий вид.

Рис.4. Общий вид и размеры 1-усовершенствованной футеровки цилиндрической части барабана мельницы ММС-7000x2300

В разработанном техническом решении 1 разработана конструкция 1-усовершенствованной футеровки, отличающегося от стандартных футеровок цилиндрической части барабана шаровой мельницы, т.е. высота выступа в средней части футеровки снижена с 165 мм до 95 мм и убраны рёбра, расположенные под углом к двум боковым подъёмникам. Вид и размеры конструкции 1-усовершенствованной футеровки представлены на рис.4.

С целью повышения износостойкости и срока службы футеровки барабана шаровой мельницы ММС в разработанном техническом решении №2

С этой целью разработано несколько усовершенствованных типов проектов футеровок для повышения эффективности режима работы шаровых мельниц за счет внесения конструктивных изменений в элементы базовых футеровок и повышения их износостойкости.

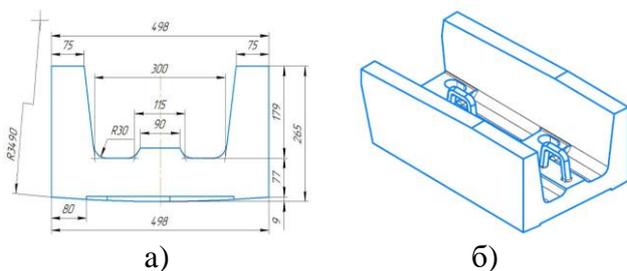
разработана 2-усовершенствованная конструкция футеровок цилиндрической части барабана мельницы, представленная на рис.5.

В процессе изготовления 2-усовершенствованных футеровок разработаны предложения по увеличению высоты двух боковых подъемников, расположенных над частью плиты, с 265 мм до 330 мм.

Футеровки люков в цилиндрической части барабана мельницы

конструктивно идентичны футеровкам, устанавливаемым в цилиндрической части барабана. 1-усовершенствованная конструкция футеровок отличается от базовых футеровок именно размерами центрального выступа и удалением ребер и весом 488 кг и имеет желобчатую форму.

Конструктивный вид и основные размеры усовершенствованных футеровок представлены на рис.6.



а – вид спереди и размеры; б – общий вид.

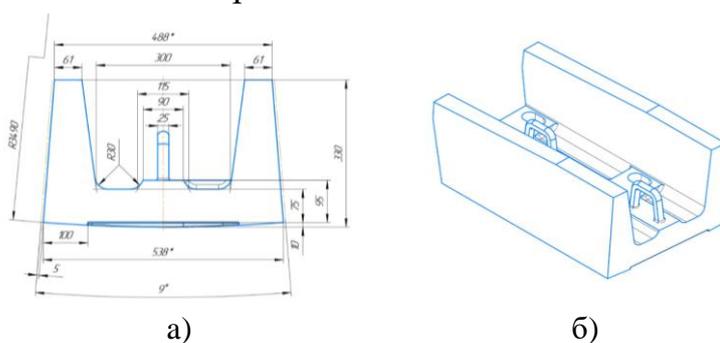
Рис.6. Для люков цилиндрической части мельничного барабана ММС-7000х2300

Общий вид и размеры

1-усовершенствованной футеровки

цилиндрической части барабана мельницы составляет от 265 мм до 330 мм, а вес – 525 кг.

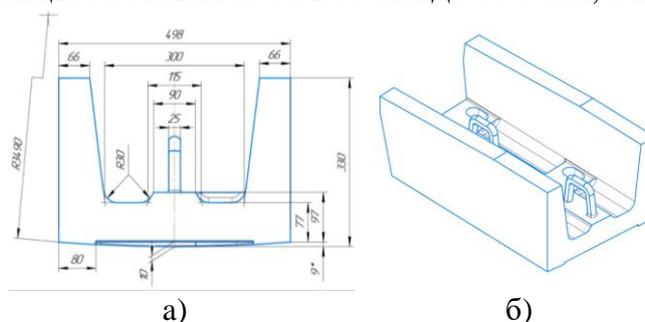
Для определения силы воздействия измельчающих средств и руд на футеровки цилиндрической части барабана при его движении, их связи с футеровкой в качестве метода численного моделирования использовали ДЭМ, а для анализа законов движения и механических свойств зернистых частиц использовали второй закон Ньютона. Кроме того, для обеспечения точного представления и моделирования



а – вид спереди и размеры; б – общий вид.

Рис.5. Общий вид и размеры 2-усовершенствованной футеровки для цилиндрической части барабана мельницы ММС-7000х2300

В целях повышения износостойкости и срока службы футеровки барабана шаровой мельницы ММС в разработанном техническом решении разработана конструкция 2-усовершенствованной футеровки для люков цилиндрической части барабана, вид которого представлен на рис.7. Высота подъемников 2-усовершенствованных футеровок, разработанных для люков



а – вид спереди и размеры; б – общий вид.

Рис.7. Общий вид и размеры 2-усовершенствованной футеровки для люков цилиндрической части мельничного барабана ММС-7000х2300

взаимодействия руды и шаров друг с другом мы используем модель контакта Герца-Миндлина (без скольжения).

Согласно второму закону Ньютона, в математическом моделировании уравнение движения для любой частицы i выражается следующим образом:

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = -u_{r,ij} F_{ij} R_i \frac{w_i}{|w_i|} + \sum_j R_i \times F_{t,ij} = \sum M \quad (17)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_j (F_{n,ij} + F_{t,ij}) = \sum F \quad (18)$$

где, I_i – момент инерции; w_i – угловая скорость; m_i – масса грузопотока; R_i – радиус барабана; $F_{n,ij}$ и $F_{t,ij}$ – нормальные и тангенциальные силы между частицами i и j соответственно. $u_{r,ij}$ – коэффициент трения при сдвиге между частицами i и j ; g – ускорение свободного падения; t – время; $\sum M$ и $\sum F$ – результирующий момент и результирующая сила частицы i соответственно.

В ходе исследования использовали программу Rocky DEM с дискретными элементами для моделирования процесса износа футеровки барабана шаровой мельницы.

В программном обеспечении Rocky DEM на основе закона износа Арчарда поэтапно рассмотрен процесс износа, возникающий на поверхности футеровки:

$$\Delta V = C \Delta W_\tau \quad (19)$$

где, ΔV – объем материала, изнашиваемого за период исследования; ΔW_τ – тангенциальная или сдвиговая работа, совершаемая частицами при столкновении потока груза с поверхностью в течение времени исследования; C – коэффициент, $C = k/H$.

Анализ износа футеровок с помощью программного обеспечения Rocky DEM представлен на рисунке 8.

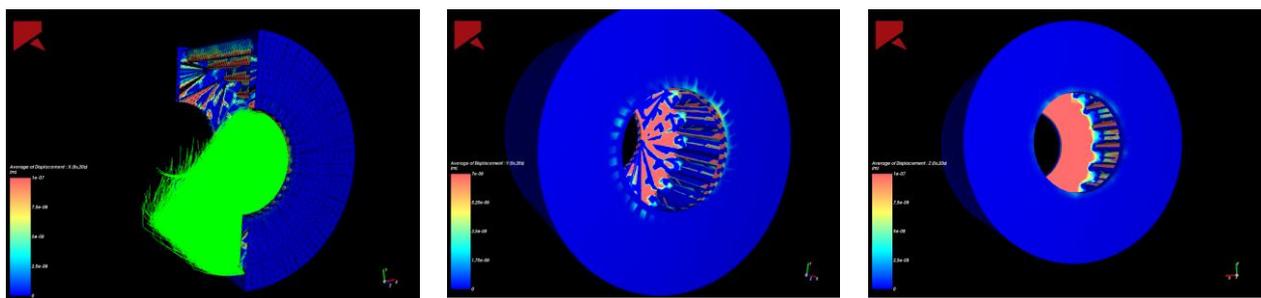
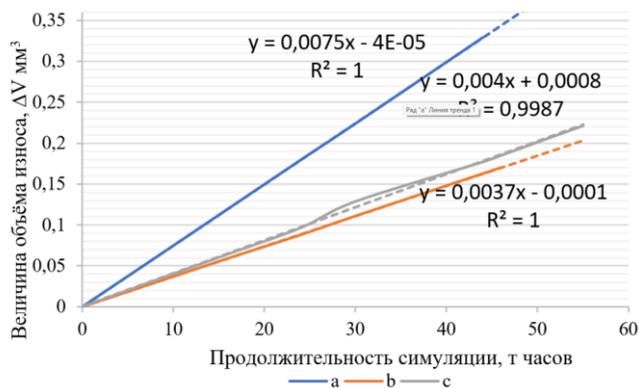


Рис.8. Износ футеровки барабана мельницы ММС

На основе вышеперечисленных этапов в процессе исследований, проведенных в программе ROCKY DEM Particle Simulator, были определены значения зависимости от величины объема износа в процессе моделирования для базовой защитной футеровки, применяемой для цилиндрической части шаровой мельницы, а также для усовершенствованных защитных футеровок 1 и 2. На основании этих выявленных результатов в программе ROCKY DEM Particle Simulator был установлен график зависимости продолжительности моделирования от величины разрушения для различных футеровок, предназначенных для цилиндрической части, на рисунках 9 и 10 ниже.

Из графиков сравнительной зависимости, представленных на рис. 9 и 10, видно, что в процессе моделирования результаты значений величины износа различных футеровок, предназначенных для цилиндрической части и люка

цилиндрической части, фиксировались каждые 8 часов. В процессе моделирования было установлено, что общая продолжительность базовых защитных футеровок до допустимого износа составляет 44 часа, общая продолжительность 1-усовершенствованных футеровок до допустимого износа составляет 46 часов, а 2-усовершенствованных футеровок - 48 часов, а 2-усовершенствованные футеровки на 20% выше базовых футеровок и на 16,4% выше 1-усовершенствованных футеровок.



а – базовый; б – 1-усовершенствованный; с – 2- усовершенствованная футеровка
Рис.9. График удельной зависимости величины объема износа различных футеровок для цилиндрической части барабана мельницы в программе ROCKY DEM Particle Simulator для продолжительности моделирования

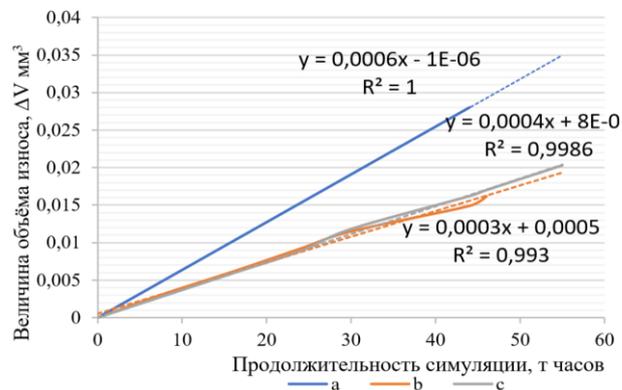


Рис.10. График удельной зависимости величины объема износа различных футеровок, предназначенных для люка цилиндрической части барабана мельницы в программе ROCKY DEM Particle Simulator для продолжительности моделирования

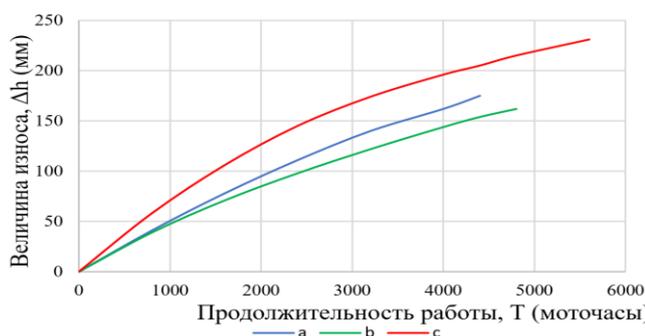
В четвертой главе диссертации «Методика и результаты экспериментальных исследований усовершенствованных конструкций футеровок шаровых мельниц» приведены экспериментальные исследования по определению эффективности усовершенствованных конструкций футеровок цилиндрической части барабана шаровой мельницы, разработка экспериментальных исследований и методики по определению эффективности усовершенствованных конструкций футеровок люк цилиндрической части барабана шаровой мельницы, разработка математических моделей, позволяющих определить величину износа и коэффициенты сцепления усовершенствованной футеровки, оценка технико-экономических показателей предлагаемых технических решений.

Экспериментальное исследование эффективности футеровок с усовершенствованной конструкцией предусматривается проводить в следующие этапы:

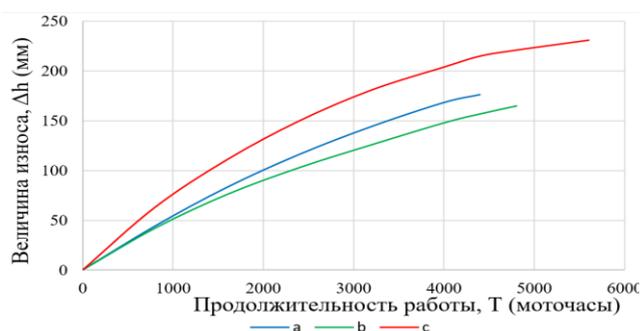
В ходе опытно-экспериментальных работ все базовые и усовершенствованные элементы футеровок определялись по показателям износа их средней толщины при работе каждые 800 мото-часов.

В результате экспериментальных испытаний установлено, что в 1-усовершенствованных футеровок износ подъемников составил 34-42 мм за первые 0-1600 мото-часов, снизился до 21-22 мм за последующие 1600-4800 мото-часов, а максимальный срок службы составил 4800 мото-часов.

Установлено, что у 2-усовершенствованных футеровок за 0-1600 мото-часов износ снизился до 48-63 мм, за следующие 1600-5600 мото-часов до 15-16 мм, а максимально допустимый срок службы составил 5600 мото-часов, а график зависимости результатов экспериментов представлен на рисунке 11.



а - базовое; б - 1-усовершенствованное; в - 2- усовершенствованная футеровка
Рис.11. График зависимости износа базовых и усовершенствованных футеровок цилиндрической части барабана мельницы от срока службы



а - базовое; б - 1-усовершенствованное; в - 2- усовершенствованная футеровка
Рис.12. График зависимости износа базовой и усовершенствованной футеровки люков цилиндрической части барабана мельницы от срока службы

Опытно-экспериментальные исследования футеровки в люках цилиндрической части барабана мельницы, как и футеровки в цилиндрической части барабана, проводились в три этапа, то есть для базовой, 1-усовершенствованной и 2-усовершенствованной футеровки. По результатам проведенных опытно-экспериментальных испытаний график зависимости срока службы футеровок от величины износа по подъемникам приведен на рис. 12.

Результаты проведенных научно-исследовательских работ и практических опытно-экспериментальных испытаний показывают, что конструкция 2-усовершенствованной футеровки, установленной в люках цилиндрической части барабана мельницы, отличается высокой износостойкостью.

С учетом комплексного рассмотрения вышеуказанных факторов, усиленный (реальный) коэффициент сцепления для усовершенствованного футеровки выражается следующим образом:

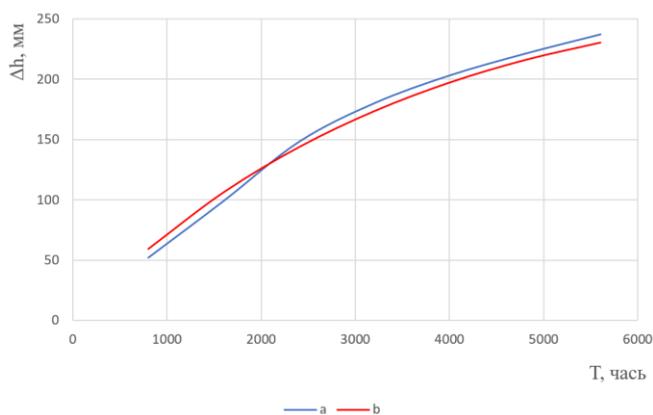
$$\mu = (\mu_0 + \alpha \cdot v^n - b \cdot T^m) \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{\tan(\alpha_f)}{R_b}\right) \quad (20)$$

где, μ – общий (эффективный) коэффициент сцепления; μ_0 – коэффициент трения (сцепления) в статическом состоянии; α – коэффициент чувствительности к скорости (определяется эмпирически); v – относительная скорость скольжения между контактными поверхностями; n – степень зависимости от движения ($0 < n < 1$); b – коэффициент температурной чувствительности; T – температура в зоне контакта (Кельвин); m – степень температурной зависимости (обычно $m \approx 1$); γ – эмпирический поправочный коэффициент, зависящий от геометрии (характерный для формы профиля); α_f – угол трения (изгиба) в зоне контакта; R_b – радиус выпуклости профиля футеровки. $(\mu_0 + \alpha \cdot v^n - b \cdot T^m)$ – трибологическая модель (влияние скорости и температуры); $\left(1 + \gamma \cdot \frac{\tan(\alpha_f)}{R_b}\right)$ – геометрическая модель (влияние кривой поверхности).

Величина износа, усовершенствованного футеровки мельницы определяется по обобщенной итоговой математической модели:

$$W = \frac{[\mu_0 + av^n - bT^m] \cdot (1 + \gamma \cdot \frac{\tan(\alpha_f)}{R_b}) \cdot P \cdot v \cdot t}{H_0 - \lambda T} \cdot (1 + \beta \cdot \frac{A_{lokal}}{A_p}) \quad (21)$$

где, P – контактное давление, (если контактная поверхность A одинакова, $P = F_N/A$); H_0 – исходная (при нормальной температуре) твердость; λ – коэффициент температурной чувствительности; β – поправочный коэффициент, определяемый экспериментально; A_{lokal} – площадь местной зоны непосредственного приложения силы (например, вершины выступов); A_p – площадь общего контактного профиля;



а - величины износа футеровок за время, определенные экспериментально;
 б - величины износа футеровок за время, определенные результатами разработанной математической модели
Рис.13. Зависимость, показывающая уровни точности величин износа футеровок за время, определенные с помощью результатов экспериментов и разработанной математической модели

Относительные погрешности, представленные на рисунке 13 выше, составляют от 7,2 до 13,8 на каждые 800 мото-часов, а их среднее значение (степень точности) составляет 5,1%. В ходе данного исследования взаимные различия находились в пределах 4,42-7,17 мм, а относительная погрешность составляла 1%, что указывает на высокую точность и возможность практического использования данной математической модели. Кроме того, на основе разработанной математической модели можно прогнозировать срок службы футеровки любой новой конструкции, что является основой для оптимизации технологического режима, прогнозирования срока службы при практической эксплуатации, определения интервала технического обслуживания.

За счет установки 2-ой предлагаемой усовершенствованной футеровки на мельницу ММС-7000х2300 ее вес уменьшился на 7562 кг по сравнению с базовыми футеровками. В результате этого коэффициент наполнения барабана ф увеличился. То есть, плотность стали 110G13L, из которой изготавливается футеровка, составляет примерно 7850 кг/м³, и если рассматривать измельчаемую горную породу как гранит, то в барабан мельницы будет добавляться дополнительно 2553 кг избыточной горной породы в час.

В результате внедрения разработанных футеровок новой конструкции на мельницах марки ММС-7000х2300 достигнуто повышение износостойкости футеровок цилиндрической части барабана мельницы предлагаемой усовершенствованной новой конструкции на 25% по сравнению с ранее примененными футеровками.

Также в результате внедрения новой конструкции футеровок в люках цилиндрической части барабана мельницы на мельницах марки ММС-7000х2300 износостойкость футеровок увеличилась на 25%.

Таким образом, в результате внедрения предлагаемых разработок на мельницах ММС-7000х2300, применяемых на 2-м гидрометаллургическом заводе АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» удалось сократить время простоя каждой мельницы на 2-3% в год и снизить потребность в футеровках на 22%.

С применением предлагаемой усовершенствованной футеровки цилиндрической части барабана шаровой мельницы и люков цилиндрической части определим эффективность эксплуатационных затрат за один год на одну мельницу следующим способом:

$$E_T = E_{T_2} + E_{2.люк} = 657700 + 39484 = 697184 \quad \text{тысяча сумов} \quad (22)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам на тему «Повышение эффективности работы шаровых мельниц на основе совершенствования конструкции их футеровок» представлены следующие выводы, имеющие теоретическую и практическую значимость:

1. Выявлены факторы, отрицательно влияющие на эффективность мельниц типа ММС-7000х2300, которые выражаются в следующих показателях: износ футеровок-52%, неисправности электрической части-17%, износ и поломка зубчатой передачи-13%, неисправности системы смазки-8%, недостаточный поток загрузки-7%.

2. Разработана математическая модель позволяющей определить коэффициент сцепления, учитывающая геометрию футеровки, угол α , коэффициент заполнения φ и скорость вращения ψ , на основе которой создано программное обеспечение на языке Python.

3. Разработана математическая модель, позволяющая анализировать процессы трения, оценивать энергетические потери и прогнозировать износ футеровок с учётом скорости вращения барабана мельницы, температурных значений и конструктивных особенностей защитных футеровок. Для данной модели создано программное обеспечение на языке программирования Python.

4. В результате анализа состояния элементов футеровки барабана мельниц типа ММС, эксплуатируемых на гидрометаллургических заводах АО НГМК, установлено, что 16% общих неисправностей приходится на механические изломы и отрывы от стенок барабана, а 84% - на износ в результате абразивного износа.

5. Разработаны две усовершенствованные конструкции защитных футеровок для цилиндрической части барабана шаровой мельницы: первая - с уменьшением высоты поперечного рельефа базовой футеровки с 165 мм до 95 мм и удалением существующих рёбер, что позволило повысить прочность футеровки, вторая - с увеличением высоты боковых подъёмников над

плитной частью с 265 мм до 330 мм, что также способствует повышению эксплуатационной надёжности футеровок.

6. разработаны первая и вторая усовершенствованные конструкции защитных футеровок для цилиндрической части барабана мельницы, в области технологических отверстий. По сравнению с базовой футеровкой массой 626 кг, в них внесены изменения в геометрические параметры, в результате чего масса составила соответственно 488 кг и 525 кг, что обеспечивает повышение эффективности работы мельницы.

7. В результате проведённого анализа с использованием программы ROCKY DEM Particle Simulator установлено, что работоспособность вторых усовершенствованных защитных футеровок на 20% выше по сравнению с базовыми и на 16,4% выше по сравнению с первыми усовершенствованными футеровками.

8. На основе результатов экспериментально-опытных исследований установлено, что максимальный эксплуатационный срок первых усовершенствованных футеровок составляет 4800 мото-часов, а вторых усовершенствованных - 5600 мото-часов. Это свидетельствует о том, что срок службы вторых усовершенствованных футеровок на 20–25% выше, чем у базовых защитных футеровок.

9. Разработана математическая модель, позволяющая определить объемный износ защитных футеровок в процессе взаимодействия с горными породами и шарами по коэффициенту сцепления, и на этой основе создано программное обеспечение модели на языке C++.

10. В результате применения предложенных усовершенствованных футеровок для цилиндрической части барабана шаровой мельницы и её люка годовой экономический эффект для одной мельницы составил 697 184 тысяч сумов.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.17/04.06.2021.T.06.02 AT THE NAVOI STATE UNIVERSITY OF
MINING AND TECHNOLOGY**

NAVOI STATE UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY

ABDULLAYEV SARDOR HUSNIDDINOVICH

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF WORKING OF SPHERE MILL
COATINGS BY IMPROVING THEIR DESIGN.**

04.00.16 – Mining machines

**DISSERTATION ABSTRACT
FOR THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) OF TECHNICAL SCIENCES**

The topic of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) is registered in the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under NoB2025.1.PhD/T5277.

The dissertation was completed at the Navoi State Mining and Technology University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume) on the website of the Scientific Council (www.nsmut.uz) and on the information and educational portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Abduazizov Nabijon Azamatovich**
doctor of sciences (DSc), professor

Official opponents: **Egamberdiyev Ilkhom Pulatovich**
doctor of sciences (DSc), professor

Raykhonov Shukhrat Zaripovich
Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)

Leading organization: **JSC «Almalyk mining and metallurgical combine»**

The defence of the dissertation will be held on 28 November 2025 y. at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific council of scientific degrees DSc.17/04.06.2021.T.06.02 at the Navoi State Mining and Technology University. Address: 210100, Navoi, G'alaba shoh street, 76v. Conference Hall of the Navoi State Mining and Technology University. Phone: (79) 223-04-40; fax: (79) 223-49-66; e-mail: info@nsmut.uz, nsmi@gmail.com.

The doctoral dissertation has been registered at the Information Resource Centre of the Navoi State Mining and Technology University (registered under No. 236). Address: 210100, Navoi, G'alaba shoh street, 76m. Phone: (79) 223-04-40; fax: (79) 223-49-66.

The abstract of the dissertation is distributed on «13» November 2025 y.
(Protocol at the register No 161 dated «13» November 2025 y.).



I.T.Mislibayev

Chairman of the Scientific Council
for awarding the scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

R.U.Djurayev

Scientific Secretary of the Scientific Council
for awarding of scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

A.B.Tuxtashev

Deputy Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific
Council for the award of academic degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD))

The aim of the research increasing the efficiency of their operational indicators based on the development of improved designs of protective coatings for ball mills.

The research object as protective elements in the cylindrical part and hatches of the cylindrical part of the self-propelled ball mill drum.

The scientific novelty of the research:

The change in the value of the adhesion coefficient in the linings of the ball mill was determined based on the values of the friction coefficients arising from the normal reaction force, gravity force, and action force;

The relationship between the adhesion coefficients formed as a result of the interaction of the coating with rocks and steel balls, taking into account the adhesion forces and temperature during the process of grinding rocks in a ball mill, was determined, and a mathematical model was developed that allows them to be calculated;

The design of the lining of the cylindrical part of the drum of a ball mill has been improved based on modeling the processes of dynamic interaction of balls and rocks;

A mathematical model has been developed that allows determining the magnitude of volumetric wear of the mill lining, taking into account the geometric parameters of the ball mill and rocks, the adhesion coefficient, the pressure arising on the contact surface, and the hardness of the material.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on increasing the efficiency of grinding process indicators by improving the design of coatings of the cylindrical part of the drum of a ball mill:

coatings of the cylindrical part of the drum of the ball mill were introduced at the №2 hydrometallurgical plant of JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combine» (certificate of JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combine» № 23/01-01-07/220 dated March 20, 2025). As a result, the wear resistance of the MMS-7000x2300 self-propelled mills increased by 25% compared to previously used coatings;

coatings of the cylindrical part of the drum of the ball mill were introduced at the № hydrometallurgical plant of JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combine» (certificate of JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combine» № 23/01-01-07/220 dated March 20, 2025). As a result, the wear resistance of the openings of the cylindrical part of the MMS-7000x2300 self-propelled mill drum increased by 25% compared to previously used coatings.

The structure and content of the thesis. The structure of the dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and appendices. The content of the dissertation is 118 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST of PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I част; part I)

1. Abduazizov N.A., Abdullayev S.H. Sharli tegirmon qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyalarini qo'llash orqali ularning samaradorligini asoslash // Journal of Advances in Engineering Technology. – Vol.3(15), – 2024. – pp. 83-90. (12. Index Copernicus International. ICV 62.33)

2. Abdullayev S.H. Sharli tegirmonlarning qoplama profiliga ta'sir qiluvchi kuch va koeffitsiyentlarning nazariy tahlili // International Journal of Advanced Technology and Natural Science. – Vol.4(5), –2024. – Pp. 31-39. (12. Index Copernicus International. ICV 59.77)

3. Abduazizov N.A., Abdullayev S.H. Sharli tegirmon qoplamalarining ekspluatatsiya jarayonidagi ishdan chiqish holatlarining tadqiqoti // Konchilik mashinalari va texnologiyalari. №1(11), –2025. – 9-13 b. (OAK 04.00.00.)

4. Abduazizov N.A., Abdullayev S.H. Sharli tegirmon barabani qoplamalarining takomillashtirilgan konstruksiyasini ishlab chiqish // Sanoatda raqamli texnologiyalar. – Vol.3, №2, – 2025. – 15-19 b. (OAK 05.00.00.)

5. Abdullayev S.H. Analysis of the improved lining design of ball mill drums // Universum: технические науки: научный журнал. – Москва, 2025. № 4(133). М., – Vol.45(3), – 2025. – Pp. 52-54. (02.00.00; №1).

6. Abdullaev S.H. Analysis of the hardness and chemical composition of metals used in mill linings // Universum: технические науки. – Москва, 2025. – №2 (119). – С. 47-53 (02.00.00; №1).

II bo'lim (II част; part II)

7. Abdullayev S.H., Abduazizov N.A., Aslanov A.X. Sharli tegirmon qoplamalarini samarali ishlash tahlili // Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari IV-Xalqaro ilmiy-amaliy anjumani. – Navoiy, 2023. – 33 b.

8. Abduazizov N.A., Abdullayev S.H., Zhuraev A., Turdiyev S. Experimental study of improved constructions increasing the efficiency of ball mill protective coatings used in enrichment factories // E3S Web of Conferences 525, 06006 (2024), – GEOTECH-2024.

9. Abduazizov N.A., Abdullayev S.H. Sharli tegirmon himoya qoplamalarining samaradorligini oshiruvchi takomillashtirilgan konstruksiyalarining tajriba-sinov tadqiqoti // Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari mavzusidagi V-Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. – Navoiy, 2024. – Vol.I, – 81-83 b.

10. Abduazizov N.A., Abdullayev S.H., Jurayev A.Sh., Turdiyev S.A., Ismatov A.A. Sharli tegirmon qoplamasini ish rejimini ko'rsatkichlari tahlili // «Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari» V-Xalqaro ilmiy-amaliy anjumani. – Navoiy, 2024. Vol.II, – 81-82 b.

11. Abdullayev S.H., Salimova Sh.S. Boyitish korxonalarida qo‘llaniladigan sharli tegirmon qoplamalarining ekspluatatsiya jarayoni tahlili // «Fan va texnika taraqqiyotida intellektual yoshlarning o‘rni» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. – Toshkent, 2024. – 933-935 b.

12. Abdullayev S.H., Salimova Sh.S. Boyitish korxonalarida qo‘llaniladigan sharli tegirmon himoya qoplamalarining samaradorligini oshirish // «Fan va texnika taraqqiyotida intellektual yoshlarning o‘rni» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. – Toshkent, 2024. – 1081-1084 b.

13. Abdullayev S.H., Abduazizov N.A., Turdiyev S.A., Jurayev A.Sh., Ismatov A.A., Mamasharifov B.R., Adizov D.Sh. Sharli tegirmonlarda takomillashtirilgan qoplamalar ilashish koeffitsiyentini aniqlash // № DGU 52455 guvohnoma elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dastur 13.06.2025 yil.

14. Abdullayev S.H., Abduazizov N.A., Turdiyev S.A., Jurayev A.Sh., Ismatov A.A., Mamasharifov B.R., Adizov D.Sh. Sharli tegirmonlarda qoplamalar yedirilish va ilashish koeffitsiyenti o‘rtasidagi bog‘liqlikni ifodalash // № DGU 52456 guvohnoma elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dastur 13.06.2025 yil.

15. Abdullayev S.H., Abduazizov N.A., Turdiyev S.A., Jurayev A.Sh., Shavkatov B.Sh. Takomillashtirilgan qoplamalarning yedirilish miqdori va ilashish koeffitsiyentlarini aniqlash // № DGU 54030 guvohnoma elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dastur 04.08.2025 yil.

Avtoreferat «O‘zbekiston konchilik xabarnomasi» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.