

MUHANDISLIK

& IQTISODIYOT

№7

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

2025 IYUL



Milliy nashrlar

OAK: <https://oak.uz/pages/4802>

05.00.00 - Texnika fanlari

08.00.00 - Iqtisodiyot fanlar



Google Scholar

OPEN ACCESS

ULRICHSWEB[®]
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

Academic Resource Index
ResearchBib

ISSN INTERNATIONAL
STANDARD SERIAL
NUMBER
INTERNATIONAL CENTRE

CYBERLENINKA

OpenAIRE

ROAD

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

BASE

Crossref

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

ECONOMIC
Business | Finance | Investment

UZBEKISTAN

РЭУ.РФ
РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Г.В. ПЛЕХАНОВА
ТАШКЕНТСКИЙ ФИЛИАЛ



muhandislik **& iqtisodiyot**

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Bosh muharrir:

Zokirova Nodira Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, DSc, professor

Bosh muharrir o'rinbosari:

Shakarov Zafar G'aforovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD, dotsent

Tahrir hay'ati:

Abduraxmanov Kalendar Xodjayevich, O'z FA akademigi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Sharipov Kongratbay Avezimbetovich, texnika fanlari doktori, professor

Maxkamov Baxtiyor Shuxratovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Abduraxmanova Gulnora Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shaumarov Said Sanatovich, texnika fanlari doktori, professor

Turayev Bahodir Xatamovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Nasimov Dilmurod Abdulloyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Allayeva Gulchexra Jalgasovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Arabov Nurali Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Maxmudov Odiljon Xolmirzayevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Xamrayeva Sayyora Nasimovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bobonazarova Jamila Xolmurodovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Irmatova Aziza Baxromovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bo'taboyev Muhammadjon To'ychiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shamshiyeva Nargizaxon Nosirxuja kizi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor,

Xolmuxamedov Muhsinjon Murodullayevich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Xodjayeva Nodiraxon Abdurashidovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Amanov Otabek Amankulovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Toxirov Jaloliddin Ochil o'g'li, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Qurbonov Samandar Pulatovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Zikriyoyev Aziz Sadulloyevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tabayev Azamat Zaripbayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sxay Lana Aleksandrovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Ismoilova Gulnora Fayzullayevna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Djumaniyazov Umrbek Ilxamovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kasimova Nargiza Sabitdjanovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kalanova Moxigul Baxritdinovna, dotsent

Ashurzoda Luiza Muxtarovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sharipov Sardor Begmaxmat o'g'li, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sharipov Botirali Roxataliyevich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, professor

Tursunov Ulug'bek Sativoldiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), dotsent

Bauyetdinov Majit Janizaqovich, Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti dotsenti, PhD

Botirov Bozorbek Musurmon o'g'li, Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sultonov Shavkatjon Abdullayevich, Kimyo fanlari doktori, (DSc)

Jo'raeva Malohat Muhammadovna, filologiya fanlari doktori (DSc), professor.



muhandislik & iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

- | | |
|--|--|
| <p>05.01.00 – Axborot texnologiyalari, boshqaruv va kompyuter grafikasi</p> <p>05.01.01 – Muhandislik geometriyasi va kompyuter grafikasi. Audio va video texnologiyalari</p> <p>05.01.02 – Tizimli tahlil, boshqaruv va axborotni qayta ishlash</p> <p>05.01.03 – Informatikaning nazariy asoslari</p> <p>05.01.04 – Hisoblash mashinalari, majmualari va kompyuter tarmoqlarining matematik va dasturiy ta'minoti</p> <p>05.01.05 – Axborotlarni himoyalash usullari va tizimlari. Axborot xavfsizligi</p> <p>05.01.06 – Hisoblash texnikasi va boshqaruv tizimlarining elementlari va qurilmalari</p> <p>05.01.07 – Matematik modellashtirish</p> <p>05.01.11 – Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt</p> <p>05.02.00 – Mashinasozlik va mashinashunoslik</p> <p>05.02.08 – Yer usti majmualari va uchish apparatlari</p> <p>05.03.02 – Metrologiya va metrologiya ta'minoti</p> <p>05.04.01 – Telekommunikatsiya va kompyuter tizimlari, telekommunikatsiya tarmoqlari va qurilmalari. Axborotlarni taqsimlash</p> <p>05.05.03 – Yorug'lik texnikasi. Maxsus yoritish texnologiyasi</p> <p>05.05.05 – Issiqlik texnikasining nazariy asoslari</p> <p>05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari</p> <p>05.06.01 – To'qimachilik va yengil sanoat ishlab chiqarishlari materialshunosligi</p> | <p>05.08.03 – Temir yo'l transportini ishlatish</p> <p>05.09.01 – Qurilish konstruksiyalari, bino va inshootlar</p> <p>05.09.04 – Suv ta'minoti. Kanalizatsiya. Suv havzalarini muhofazalovchi qurilish tizimlari</p> <p>10.00.06 – Qiyosiy adabiyotshunoslik, chog'ishtirma tilshunoslik va tarjimashunoslik</p> <p>10.00.04 – Yevropa, Amerika va Avstraliya xalqlari tili va adabiyoti</p> <p>08.00.01 – Iqtisodiyot nazariyasi</p> <p>08.00.02 – Makroiqtisodiyot</p> <p>08.00.03 – Sanoat iqtisodiyoti</p> <p>08.00.04 – Qishloq xo'jaligi iqtisodiyoti</p> <p>08.00.05 – Xizmat ko'rsatish tarmoqlari iqtisodiyoti</p> <p>08.00.06 – Ekonometrika va statistika</p> <p>08.00.07 – Moliya, pul muomalasi va kredit</p> <p>08.00.08 – Buxgalteriya hisobi, iqtisodiy tahlil va audit</p> <p>08.00.09 – Jahon iqtisodiyoti</p> <p>08.00.10 – Demografiya. Mehnat iqtisodiyoti</p> <p>08.00.11 – Marketing</p> <p>08.00.12 – Mintaqaviy iqtisodiyot</p> <p>08.00.13 – Menejment</p> <p>08.00.14 – Iqtisodiyotda axborot tizimlari va texnologiyalari</p> <p>08.00.15 – Tadbirkorlik va kichik biznes iqtisodiyoti</p> <p>08.00.16 – Raqamli iqtisodiyot va xalqaro raqamli integratsiya</p> <p>08.00.17 – Turizm va mehmonxona faoliyati</p> |
|--|--|

Ma'lumot uchun, OAK
Rayosatining 2024-yil 28-avgustdagi 360/5-son qarori bilan "Dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro'yxati"ga texnika va iqtisodiyot fanlari bo'yicha "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali ro'yxatga kiritilgan.

Muassis: "Tadbirkor va ishbilarmon" MChJ

Hamkorlarimiz:

1. Toshkent shahridagi G.V.Plexanov nomidagi Rossiya iqtisodiyot universiteti
2. Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti
3. Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" milliy tadqiqot universiteti
4. Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
5. Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
6. Toshkent davlat transport universiteti
7. Toshkent arxitektura-qurilish universiteti
8. Toshkent kimyo-texnologiya universiteti
9. Jizzax politexnika instituti



MUNDARIJA

Yashil ish o'rinlari va ekologik ta'lim: o'zbekiston yoshlari uchun yangi imkoniyatlar	12
Rashidov Saidislom, Zaripova Mardona	
Soliqlarni to'lashdan bo'yin tovlash holatlarining informatsion assimetriyaga ta'siri	16
Babanazarova Nilufar Xolmatovna	
Iqtisodiy barqarorlikni ta'minlashda budget mablag'laridan foydalanish mexanizmining o'rni va ahamiyati	23
Rustamova Gulmira Aliqulovna	
Dasturiy mahsulotlar logistikasi	30
Uzaqov Ortik Shaymardanovich	
Banklarda moliyaviy barqarorligini ta'minlashda moliyaviy natijalar ahamiyati	35
Djalilov G'ayrat Qaxramanovich	
Oliy ta'lim muassasalarini "yashil universitet" tizimiga transformatsiya qilish istiqbollari (buxoro davlat texnika universiteti va malayziyaning oliy ta'lim muassasalari o'rtasidagi hamkorlik misolida)	39
Rahmatov Shuxrat Axatovich	
Davlat qarzi siyosati samaradorligini oshirish orqali makroiqtisodiy barqarorlikni mustahkamlash	43
Sayfutdinov Xasanboy Dilshodovich	
Оптимизация бизнес-процессов и модернизация занятости в условиях цифровизации	47
Явкачев Шохзод Зайниддин углы	
Strategik rivojlanish sharoitida investitsion jozibadorlikning o'rni	54
Otaboyev Axmed Maxsudbek o'g'li	
Kichik biznes subyektlarini moliyalashtirishni rag'batlashtirish	61
Annaklichev Saxi Saparmuxamedovich	
Альтернативный подход к распределению финансовых ресурсов для эффективного финансирования высшего образования	65
Гулшат Карлибаева	
Banklarda moliyaviy barqarorligini ta'minlashda moliyaviy natijalar ahamiyati	70
Djalilov G'ayrat Qaxramanovich	
O'zbekistonda jahon sivilizatsiyasiga ta'sir o'tkaza oladigan zamonaviy qarashlarga ega memolarning yetishmasligi	74
Nabiyev Hamidjon Mirzo o'g'li	
General Concept and Principles of Quality Management System	78
Atamirzayev Nodirbek Bekmirzayevich	
Transformatsiya jarayonida tijorat banklarining kreditlash faoliyatini rivojlantirish	84
Absamatov Anvar Ergashovich	
Интегральный показатель отбора экспертов для принятия коллегиальных диагностических решений	94
Uraqov Shokir Ulashovich	
Korxonada faoliyatini tahlil qilishda boshqaruv hisobining roli	100
Abdurasulov Xumoyun Jalil o'g'li, Axmedov Xasan Ruzibayevich	
Raqamli iqtisodiyot va buxgalteriya hisobini tashkil etish	107
Abdullayev Abdurauf	
Moliyaviy hisobotni transformatsiya qilish	112
Sheraliyev Xayrulla Karimovich	
O'zbekiston sharoitida raqamli transformatsiyaning makroiqtisodiy indikatorlarga ta'siri	116
Samarqand davlat uiversiteti, Kuldoshev Lazizjon Sharifovich	



Raqamli iqtisodiyotning turizm sohasidagi bandlik shakllariga ta'siri.....	120
Rasulova Muxabbat Teshabayevna, Normurodov Sarvar Norboy o'g'li	
Xalqaro moliya-kredit institutlari bilan hamkorlikning xorij tajribasi.....	126
Qosimov Bobur Sobirovich	
Jahonda moliyaviy munosabatlar rivojlanishida korporativ tuzilmalar faoliyatining o'rni	131
Kurbaniyazov Shaxzodbek Karimovich	
Iqtisodiyotning real sektor subyektlarining faoliyatini moliya-kredit mexanizmlari orqali rag'batlantirishning xalqaro tajribasi	136
Mahmudov Nurali Komilovich	
O'zbekiston sharoitida raqamli transformatsiyaning makroiqtisodiy indikatorlarga ta'siri	140
Sanakulova Iroda, Kuldoshev Lazizjon Sharifovich	
Sho'r suvni chuchuklashtirish uchun absorber sifatida foydalanilgan quyosh elementlari tuzilmasining tajriba sinov tahlillar	144
Tursunov Muxamad Nishanovich, Sabirov Xabibullo, Axtamov Tohir Zuxriddinovich, Abriyev Shaxzod Akbar o'g'li, Bobomuratov Sardor Abdurasul o'g'li	
Развитие банков в системе цифровых финансовых услуг в Республике Узбекистан.....	151
Даденова Гульхан Кенесбаевна	
Внедрение экологических стандартов в транспортной системе: проблемы и перспективы	156
Абдурахманова М.Т.	
Elektron o'quv kontenti orqali mustaqil ta'lim va tadqiqot faoliyatini rivojlantirish.....	162
Ahunova Tamannoxon Zokir qizi	
Raqamli transformatsiya sharoitida davlat va xususiy sektorda korporativ boshqaruv strategiyasini yangilash: O'zbekiston modeli	167
Tojialiyeв Sherdorbek Elmurod o'g'li, Ergashev Axmadjon Maxmudjon o'g'li	
Jismoniy shaxslar uchun aksiyalar bozoriga kirish strategiyalari va investitsiya imkoniyatlari: O'zbekiston va xalqaro tajriba tahlili	171
O'raqov Bekzodbek Abdurayxon o'g'li	
Energetika tarmog'ida moliyaviy hisobotning xalqaro standartlarini (mhxs) joriy etishning nazariy asoslari	176
Uralov Temur Boxodir O'g'li	
Nodavlat notijorat tashkilotlarini mablag'larini shakllanishi va nazorat qilinishi	181
Xolbekov Ulug'bek Toshpulat o'g'li	
Oliy ta'lim muassasalarining xalqaro reyting ko'rsatkichlarini oshirishning strategik boshqaruv mexanizmlari	185
Mamajonova Muxlisaxon Muzaffar qizi	
Economic Efficiency of Digital Twin and Bim Technologies in Construction Enterprises.....	189
Nigmatjonova Nozima Ulmasjonovna	
Uzumchilikka ixtisoslashgan xo'jaliklarning iqtisodiy samaradorligini oshirish yo'llari	197
Tursunov To'fqin Jo'raqulovich	
Совершенствование проверки налогового аудита в Узбекистане	202
Юсупов Мансур Расулович	
Navoiy viloyatida mehnat resurslaridan foydalanishni ekonometrik modellashtirish usullari	207
Hamroyev Anvar Ashurovich	
Texnika fanining bugungi kunda o'rni va ahamiyati	214
Ulasheva Shaxlo Tagayevna, Xujamurotova Mashxura G'ayrat qizi	
Globalashuv sharoitida mamlakat iqtisodiy xavfsizligini ta'minlash masalalari.....	219
Nurmurodov Olmos Eshmuradovich	
Banklarda xalqaro hisob-kitoblar hisobini takomillashtirish	226
Uzaqova Gulmira Yuldashovna	



Korxonalar mehnat unumdorligiga ta'sir etuvchi asosiy omillar va ularning o'zaro bog'liqligi. (artel korxonasi misolida)	230
Abdug'aniyev Ilyosbek Shavkatbek o'g'li	
Gaz sanoatiga xorijiy investitsiyalarni jalb qilishning moliyaviy jihatlari	238
Ergashev Muhibbek Aslam o'g'li	
Namangan viloyatida investitsiya faoliyatining o'ziga xos xususiyatlari.....	242
Inamov Farxodjon Ikrom o'g'li	
Математическое моделирование кинематики движения шаров различного размера в барабанных мельницах	246
Акмал Жуманазаров	



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ ШАРОВ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА В БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦАХ

Акмал Жуманазаров

Генеральный директор Узбекского Агентства по техническому регулированию при Кабинете Министров Республики Узбекистан
доктор философии по техническим наукам PhD
Эл.почта: ar.jumanazarov@gmail.com

Аннотация: В статье представлена математическая модель кинематики движения шаров различных диаметров в барабанной шаровой мельнице. Модель разработана с учётом влияния геометрических параметров шаров, их положения в барабане и режимов вращения на характер движения, зоны удара и энергоёмкость процесса. Предлагаемый подход основывается на уравнениях классической механики, описывающих действующие на шар силы: гравитацию, центробежную силу, трение и нормальную реакцию стенки барабана. В отличие от существующих моделей, допущение о различии размеров шаров позволяет учитывать стратификацию среды, перераспределение кинетической энергии и неоднородность зон помола. Проведено численное моделирование движения шаров трёх типоразмеров при различных скоростях вращения барабана. Полученные результаты позволили установить зависимости между размером шаров и их кинематическими характеристиками, а также сформулировать рекомендации по оптимальному соотношению фракций шаровой загрузки. Разработанная модель может использоваться при проектировании и эксплуатации шаровых мельниц с целью повышения энергоэффективности и равномерности измельчения материала.

Ключевые слова: кинематика шаров, барабанная мельница, математическое моделирование, размер частиц, траектория движения, энергия удара, численное моделирование, эффективность помола.

Annotatsiya: Ushbu maqolada turli diametrdagi sharlarning barabanli sharli tegirmondagi harakat kinematikasini ifodalovchi matematik model ishlab chiqilgan. Modelda sharlarning geometrik parametrlari, ularning barabandagi joylashuvi va aylanish rejimlari harakat xarakteri, zarba zonalari va jarayonning energiya sarfiga qanday ta'sir etishi hisobga olingan. Taklif etilgan yondashuv klassik mexanika tenglamalariga asoslanadi va unda sharga ta'sir etuvchi kuchlar — tortishish kuchi, markazdan qochma kuch, ishqalanish kuchi va baraban devorining normal reaksiyasi hisobga olingan. Amaldagi modellardan farqli ravishda, sharlar o'lchamlarining har xilligini e'tiborga olish muhitning qatlamlanishi, kinetik energiyaning qayta taqsimlanishi va maydalash zonalaridagi nomutanosiblikni hisobga olish imkonini beradi. Barabanning turli aylanish tezliklarida uch xil o'lchamdagi sharlar harakati sonli modellash orqali tahlil qilindi. Natijalar shar o'lchami bilan ularning kinematik xususiyatlari o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash hamda optimal fraksiyalar nisbatini belgilash imkonini berdi. Ushbu model sharli tegirmonlarni loyihalash va ekspluatatsiya qilishda energiya samaradorligi va maydalash jarayonining bir xilligini oshirishga xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: sharlar kinematikasi, barabanli tegirmon, matematik modellashtirish, zarracha o'lchami, harakat trayektoriyasi, zarba energiyasi, sonli modellashtirish, maydalash samaradorligi.

Abstract: This article presents a mathematical model of the kinematics of balls of various diameters in a drum-type ball mill. The model accounts for the influence of the geometric parameters of the balls, their spatial distribution within the drum, and rotational regimes on the movement characteristics, impact zones, and energy consumption of the process. The proposed approach is based on classical mechanics equations describing the forces acting on the balls: gravity, centrifugal force, friction, and the normal reaction from the drum wall. Unlike existing models, the consideration of varying ball sizes enables the analysis of medium stratification, kinetic energy redistribution, and heterogeneity within grinding zones. Numerical simulations were conducted for three ball sizes under varying rotational speeds. The obtained results revealed correlations between ball size and kinematic behavior and allowed for the development of recommendations regarding the optimal proportion of ball size fractions. The proposed model can be effectively applied in the design and operational phases of ball mills to enhance energy efficiency and grinding uniformity.

Keywords: ball kinematics, drum mill, mathematical modeling, particle size, motion trajectory, impact energy, numerical simulation, grinding efficiency.



ВВЕДЕНИЕ

Шаровые мельницы являются ключевыми элементами оборудования в горнодобывающей, строительной и металлургической промышленности, обеспечивая тонкое и сверхтонкое измельчение материалов различной прочности и плотности. Основной рабочий орган мельницы — это вращающийся барабан, частично заполненный шарами, которые, под действием центробежных и гравитационных сил, совершают сложное движение, разрушая и измельчая загружаемый материал [1, 2].

Одним из определяющих факторов эффективности помола является размер шаров, участвующих в процессе измельчения. Шары разных диаметров обладают различной кинематикой движения, энергией удара и степенью вовлечения в контакт с обрабатываемым материалом. В промышленной практике широко применяются смеси шаров разных диаметров, что позволяет достичь как крупного разрушения, так и тонкого измельчения материала [3–5].

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ

Современные исследования в области кинематики шаров основываются на численных методах, в частности, методе дискретных элементов (DEM), который позволяет учитывать индивидуальные траектории и взаимодействие каждого элемента системы [6, 7]. Однако при проектировании и быстрой оценке технологических параметров целесообразно применять упрощённые аналитические модели, способные описывать движение шаров различного размера с приемлемой точностью и низкой вычислительной нагрузкой. Ряд существующих моделей ограничен предположением о постоянном размере шаров и игнорирует стратификацию и динамическое перераспределение энергии между фракциями. Кроме того, большинство моделей не учитывает влияние геометрических параметров (диаметр шара, плотность, масса) на кинематические характеристики — траекторию, высоту подъёма, зону падения и силу удара [8, 9]. Целью данного исследования является разработка математической модели, описывающей кинематику движения шаров различных диаметров в барабанной мельнице, с учётом их геометрических характеристик, положения в барабане и режима вращения [10-14].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2. Теоретическая модель кинематики движения шаров

2.1 Геометрическая и физическая постановка задачи

Рассматривается барабанная мельница радиусом RR , вращающаяся с постоянной угловой скоростью $\omega\omega$. Внутри барабана находятся шары различного диаметра $d_i d_i$ и массы $m_i m_i$, которые совершают сложное движение под действием гравитации, центробежной силы и трения. Радиус движения шара равен:

$$r_i = R - \frac{d_i}{2}$$

В процессе вращения шарам сообщается кинетическая энергия, за счёт которой происходит подъем вдоль стенки барабана и последующее падение, вызывающее измельчение загружаемого материала.

2.2. Силовое взаимодействие и уравнение движения

Для описания движения шаров внутри вращающейся барабанной мельницы необходимо рассмотреть систему сил, действующих на отдельный шар в любой момент времени в процессе вращения барабана. Шар рассматривается как твёрдое тело, находящееся в поле тяжести и подверженное воздействию других внешних сил, обусловленных кинематикой барабана и характеристиками его внутренней поверхности. Анализ проводится в радиальной плоскости, перпендикулярной к оси вращения барабана, в которой движение шара представляет собой сочетание вращения и свободного полёта.

На шар действуют следующие силы: сила тяжести, центробежная сила, сила нормальной реакции со стороны стенки барабана, сила трения.

$$\vec{F}_g = m_i \cdot \vec{g} \vec{F}_g = m_i \cdot \vec{g}$$

Сила тяжести ($\vec{F}_g \vec{F}_g$), направленная вертикально вниз, величина

которой определяется выражением:



где m_i — масса шара i -го диаметра, а \vec{g} — вектор ускорения свободного падения.

Центробежная сила (), возникающая при вращении барабана и направленная от центра вращения к периферии. Центробежная сила зависит как от массы шара, так и от его положения относительно оси вращения:

$$\vec{F}_c = m_i \cdot \omega^2 \cdot r_i$$

где ω — угловая скорость вращения барабана, $r_i = R - \frac{d_i}{2} = R - \frac{d_i}{2}$ — радиус движения центра шара, определяемый как разность между радиусом барабана R и половиной диаметра шара d_i .

Сила нормальной реакции со стороны стенки барабана \vec{N} , направленная перпендикулярно касательной к внутренней поверхности барабана и действующая на шар в случае его контакта с поверхностью. Эта сила компенсирует часть проекции силы тяжести и центробежной силы и играет важную роль в удержании шара вдоль траектории вращения.

Сила трения ($\vec{F}_{тр}$) возникающая между шаром и поверхностью барабана при наличии относительного скольжения. Направление этой силы противоположно направлению относительного движения шара и определяется как:

$$\vec{F}_{тр} = \mu \cdot \vec{N}$$

где μ — коэффициент трения между шаром и внутренней поверхностью барабана.

Для анализа динамики движения шара удобно перейти к проекционному рассмотрению второго закона Ньютона в радиальной плоскости. Проекцию всех сил на направление, совпадающее с радиусом вращения шара (от центра барабана к шару), можно выразить следующим уравнением:

$$m_i \cdot \frac{v_i^2}{r_i} = m_i \cdot \omega^2 \cdot r_i = N - m_i \cdot g \cdot \cos(\theta)$$

где v_i — мгновенная линейная скорость шара вдоль траектории вращения; θ — угол положения шара в барабане относительно вертикальной оси (то есть угол между вектором силы тяжести и радиусом, проведённым к шару); N — величина нормальной реакции;

$m_i \cdot g \cdot \cos(\theta)$ — проекция силы тяжести на радиальное направление.

Данное уравнение описывает условия равновесия шара на внутренней поверхности вращающегося барабана. Из него можно определить, при каких параметрах шар удерживается на стенке барабана, а при каких — теряет контакт и переходит в фазу свободного падения. Этот переход критически важен для эффективного разрушения материала в мельнице, так как именно при падении шары передают наибольшее количество энергии обрабатываемому материалу. Следовательно, определение зависимости между радиусом движения шара (а значит, и его диаметром) и угловой скоростью вращения барабана позволяет описать границу между различными режимами помола (каскадный, водопадный и центробежный), а также уточнить условия начала фазы удара шара.

2.3. Условие отрыва шара от стенки

Отрыв шара происходит тогда, когда центробежная сила становится меньше проекции силы тяжести:

$$m_i \omega^2 r_i < m_i \cdot g \cdot \cos(\theta)$$

$$\omega^2 r_i = g \Rightarrow \omega_{крит} = \sqrt{\frac{g}{r_i}} \text{ При угле } \theta = 90^\circ, \text{ т.е. в верхней точке:}$$

Или, через обороты в минуту, критическая скорость вращения барабана:

$$n_{крит} = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$$



где $D = 2RD = 2R$ — диаметр барабана (в метрах), $n_{\text{крит}}$ — в об/мин.

Таким образом, для шара диаметра d_i , условие отрыва зависит от его радиуса движения

$r_i = R - d_i/2$, т.е. шары разных размеров отрываюся с разных высот, что и приводит к стратификации и распределению зон помола (таблица 1).

Таблица 1: Параметры и зависимости для моделирования, где h — высота, с которой падает шар

Параметр	Формула / Значение
Диаметр шара	$d_i \in \{30,50,80\}$ мм
Масса шара	$m_i = \frac{\pi}{6} \cdot d_i^3 \cdot \rho$
Радиус движения	$r_i = R - \frac{d_i}{2}$
Энергия удара	$E_i = \frac{1}{2} m_i v_{\text{уд}}^2$
Время полёта	$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$
Скорость удара	$v_{\text{уд}} = \sqrt{2gh}$

2.5. Обобщённая кинематическая модель

Можно описать движение каждого шара как функцию времени и начального угла:

$$x(t) = r_i \cdot \cos(\omega t + \phi_i), \quad y(t) = r_i \cdot \sin(\omega t + \phi_i)$$

$$y(t) = r_i \cdot \sin(\omega t + \phi_i)$$

Когда $\omega^2 r_i < g \cos(\theta)$, начинается свободное падение с параболической траекторией.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

3. Численное моделирование кинематики движения шаров различных диаметров

Для моделирования были выбраны следующие параметры, характерные для промышленных мельниц среднего размера (Таблица 2):

Таблица 2: Параметры входных данных модели

Параметр	Обозначение	Значение
Внутренний диаметр барабана	D	2.0 м
Радиус барабана	R	1.0 м
Угловая скорость вращения	ω	1.8 рад/с (≈ 17.2 об/мин)
Плотность материала шаров	ρ	7850 кг/м ³
Диаметры шаров	d_i	30 мм, 50 мм, 80 мм

Коэффициент трения	μ	0.3
Ускорение свободного падения	g	9.81 м/с ²

$m_i = \frac{\pi}{6} \cdot d_i^3 \cdot \rho$ Массы шаров рассчитывались по формуле:

$r_i = R - \frac{d_i}{2}$ Радиус движения шара каждого типа:

4. Результаты численного моделирования кинематики шаров разного диаметра

В целях пространственной визуализации кинематики шаров различного диаметра было построено множество траекторий, соответствующих одинаковому углу отрыва (45°), но с вариативностью по фазе вращения и координате вдоль оси барабана. На рисунке представлены траектории шаров трёх фракций: 30 мм, 50 мм и 80 мм. Каждая группа траекторий иллюстрирует поведение соответствующего диаметра в реальных условиях рассеяния, когда движение шаров происходит не по строго фиксированной траектории, а в пределах определённой зоны.

Из рисунка 1 видно, что:

шары большего диаметра (80 мм) обладают наибольшей массой и кинетической энергией удара (до 15.52 Дж), но имеют меньшую дальность перемещения по горизонтали;

шары малого диаметра (30 мм), напротив, демонстрируют более вытянутые по горизонтали траектории и меньшую энергию удара (≈ 0.86 Дж), что связано с их меньшей массой;

вариативность начального угла и координаты вдоль оси барабана приводит к формированию «веерной» структуры траекторий, что соответствует реальным условиям каскадного помола.

Данная визуализация подтверждает важность оптимального соотношения шаров различных фракций при загрузке мельницы и демонстрирует влияние размера шара на форму траектории и зону падения. Модель может быть использована для оценки эффективной зоны измельчения и расчёта распределения энергии по объёму барабана.

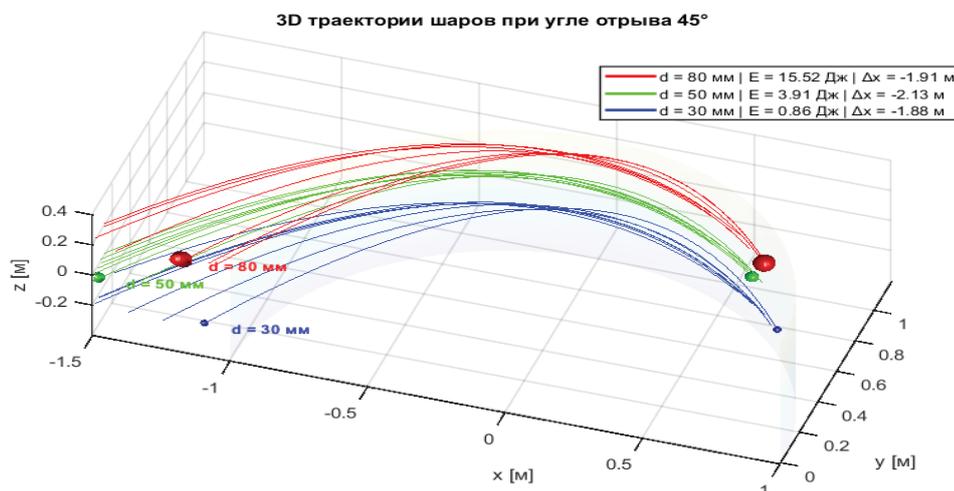


Рисунок 1. 3D-визуализация траекторий движения шаров различного диаметра (30 мм, 50 мм и 80 мм) при фиксированном угле отрыва 45°. Для каждого диаметра отображены множественные траектории, отражающие возможный разброс начальных условий (по углу отрыва и координате вдоль оси барабана).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Проведённое в работе исследование представляет собой значимый вклад в развитие аналитического моделирования кинематики движения шаров в барабанных мельницах. Предложенная авторами математическая модель позволяет с высокой степенью обобщения описывать динамику шаров различных диаметров с учётом ключевых факторов, ранее ограниченно учитываемых в упрощённых подходах: диаметра, массы, положения шара в барабане, режимов вращения, силы тяжести, центробежной силы, нормальной реакции и трения.

Одним из основных достижений данной работы является теоретически выведенное и численно подтверждённое условие отрыва шара от стенки барабана, которое напрямую зависит от его радиуса, диаметра и угловой скорости вращения. Это позволило авторам установить взаимосвязь между кинематическими параметрами шаров и границами перехода между основными режимами помола — каскадным, водопадным и центробежным. Такая детализация существенно расширяет возможности диагностики и настройки мельниц на стадиях проектирования и эксплуатации.

Особое внимание уделено влиянию диаметра шара на кинетические характеристики, включая высоту подъёма, скорость и энергию удара, что имеет непосредственное значение для энергоэффективности и равномерности помола. Численное моделирование с варьированием параметров отрыва и координаты вдоль оси барабана привело к формированию реалистичной веерной структуры траекторий, соответствующей реальным условиям работы мельницы. Это подтверждает достоверность модели и её применимость к сложным пространственным задачам.

Ключевые выводы моделирования:

шары крупного диаметра (80 мм) характеризуются наибольшей энергией удара (до 15.5 Дж), но ограниченной зоной действия по горизонтали.

мелкие шары (30 мм) демонстрируют широкие по горизонтали траектории, но низкую энергию удара (≈ 0.86 Дж).

формирование зон активного измельчения носит ярко выраженный стратифицированный характер, что требует учета в стратегии загрузки мельницы.

Научная новизна данной работы заключается в универсализации аналитического подхода к моделированию кинематики шаров различного размера без привлечения ресурсоёмких методов типа DEM. Это открывает возможности для оперативного анализа режимов работы мельниц, а также внедрения предложенного алгоритма в системы автоматизации и цифровых двойников.

Практическая значимость полученных результатов состоит в:

- возможности оптимизации гранулометрического состава шаровой загрузки;
- повышении энергоэффективности помольного процесса;
- улучшении предсказуемости износа футеровки и зон локальной перегрузки;
- адаптации модели для различных типов мельниц и условий помола.

Таким образом, разработанная модель может служить как основой для последующих исследований в области механики измельчения, так и инструментом практического инжиниринга в горно-металлургической промышленности.

Список использованной литературы

1. Wills, B.A., Napier-Munn, T. Wills' Mineral Processing Technology. 8th ed., Elsevier, 2016.
2. Gupta, A., Yan, D.S. Mineral Processing Design and Operation. Elsevier, 2006.
3. Shi, F., Xie, L., Morrison, R. «A review of grinding kinetics: Approaches and applications» // Powder Technology, 2017.
4. Verret, B., Radziszewski, P., Duchesne, C. «Modelling and simulation of ball mill wear» // Wear, 2011.
5. Cleary, P.W. «Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods» // Minerals Engineering, 2001.
6. Mishra, B.K., Rajamani, R.K. «Simulation of charge motion in ball mills. Part 1: Experimental verifications» // Int. J. Miner. Process., 1992.
7. Zhao, H., Wu, B., Yang, B. «Effects of ball size distribution and mill speed on grinding kinetics» // Powder Technology, 2019.
8. Tavares, L.M. «Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills» // Minerals Engineering, 2004.
9. Cho, H., Austin, L.G., Luckie, P.T. «The effect of ball size on mill performance» // Powder Technology, 1986.
10. Жуманазаров А.Р., Эгамбердиев И.П., Очиллов У.Ю. Разработка модели дискретных элементов для шаровых мельниц. Proceedings of the v-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 2024. Vol.2. 11-12 p.
11. Жуманазаров А.Р., Эгамбердиев И.П., Очиллов У.Ю. Влияние объема суспензии на процесс измельчения вращающейся мельницы с использованием мультиметодного подхода и анализа параметров. Proceedings of the v-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 2024. Vol.2. 17-18 p.



12. N. Karimova, U. Ochilov, Sh. Yakhshiev I. Egamberdiev, Predictive maintenance of cutting tools using artificial neural networks, XIV International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIV-2023). 2023.
13. Sh. Yakhshiev, E. Egamberdiev, A. Mamadiyarov, Kh. Ashurov, N. Khamroev, Research on Engineering Structures and Materials 9(1), 163-179, 2023.
14. N. Karimova, U. Ochilov, O. Tuyboyov, Sh. Yakhshiev, I. Egamberdiev, Advanced surface roughness characterization using 3D scanning technologies and YOLOv4, IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources, GEOTECH-2024.

muhandislik **& iqtisodiyot**

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Ingliz tili muharriri: Feruz Hakimov

Musahhih: Zokir Alibekov

Sahifalovchi va dizayner: Iskandar Islomov

2025. № 7

© Materiallar ko'chirib bosilganda "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali manba sifatida ko'rsatilishi shart. Jurnalda bosilgan material va reklamalardagi dalillarning aniqligiga mualliflar ma'sul. Tahririyat fikri har vaqt ham mualliflar fikriga mos kelmasligi mumkin. Tahririyatga yuborilgan materiallar qaytarilmaydi.

"Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali 26.06.2023-yildan
O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Adminstratsiyasi huzuridagi
Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligi tomonidan
№S-5669245 reyestr raqami tartibi bo'yicha ro'yxatdan o'tkazilgan.
Litsenziya raqami: №095310.

**Manzilimiz: Toshkent shahri Yunusobod
tumani 15-mavze 19-uy**





+998 93 718 40 07



<https://muhandislik-iqtisodiyot.uz/index.php/journal>



t.me/yait_2100