

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_4

XFTAP 55.33.41

БӨЛШЕКТЕРГЕ БІРІКТІРІЛГЕН ӘСЕР ЕТУ ЖАҒДАЙЫНДА ҰСАҚ МАЙДАЛАУ ПРОЦЕСІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЧАСТИЦЫ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FINE GRINDING PROCESS UNDER COMBINED ACTION ON PARTICLES

С.Р. Байгереев ¹, Г.А. Гурьянов ¹, А.Д. Сулейменов ^{2*}, Р. Ғабдысалық ¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²Торайғыров Университеті, Павлодар қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Ансаган Дюсембаевич Сулейменов, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz

Түйінді сөздер:

майдалап ұнтақтау, дірілді
ұнтақтау, біріктірілген әсер,
дірілді диірмен, майдалау,
соққылы-ығыстыру
жүктемелері,
микрожарықшалар түзу,
энергия тиімділігі.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада материалдарды жұқа ұнтақтау процесін әртүрлі
вибрациялық әсер ету режимдерінде зерттеудің эксперименттік
нәтижелері ұсынылған. Зерттеу үш режимде жүргізілді:
горизонтальды екіжақты, вертикальды біржақты және олардың
біріктірілген әсері. Авторлар әзірлеген арнайы конструкциялы
ұнтақтау қондырғысы материалға бір мезгілде горизонтальды
және вертикальды тербеліс күштерін түсіруге мүмкіндік береді.
Зерттеу нәтижелері ұнтақтау тиімділігі қолданылған әсер ету
бағытына тікелей тәуелді екенін көрсетті. Ең жоғары дәрежедегі
диспергирлеу біріктірілген режимде байқалды: бөлшектердің
орташа өлшемі 62 мкм-ге дейін азайды. Ударлық және ығыстыру
әсерлерінің бір уақытта орын алуы бөлшектердің көпжақты
бұзылуына, өлі аймақтардың азаюына және процестің энергия
тиімділігінің артуына ықпал етеді. Алынған нәтижелер жұқа
ұнтақтауды интенсификациялау үшін біріктірілген вибрациялық
әсерлерді қолданудың тиімді екенін дәлелдейді және энергия
тиімді ұнтақтау қондырғыларын жобалауда қолданылуы мүмкін.

Ключевые слова:

тонкое измельчение,
вибрационный помол,
комбинированное
воздействие, вибрационная
мельница,
диспергирование, ударно-
сдвиговые нагрузки,
микротрещинообразование,
энергоэффективность

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты экспериментальных
исследований процесса тонкого измельчения материалов при
различных режимах вибрационного воздействия.
Проанализированы три варианта работы помольной установки:
двустороннее горизонтальное, одностороннее вертикальное и
комбинированное воздействие. Для реализации исследования
была использована разработанная авторами конструкция
мельницы, обеспечивающая одновременное действие горизон-
тальных и вертикальных колебаний на измельчаемую среду.



© 2026 С.Р. Байгереев, Г.А. Гурьянов, А.Д. Сулейменов, Р. Ғабдысалық
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Показано, что эффективность измельчения существенно зависит от направления приложенных нагрузок. Наиболее высокая степень диспергирования достигнута при комбинированном режиме, при котором средний размер частиц уменьшился до 62 мкм. Установлено, что сочетание ударных и сдвиговых воздействий обеспечивает многоплоскостное разрушение частиц, снижает вероятность образования застойных зон и повышает энергоэффективность процесса. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения комбинированных вибрационных воздействий для интенсификации тонкого помола и могут быть использованы при проектировании энергоэффективных измельчительных установок.

keywords:

fine grinding, vibratory milling, combined impact, vibrational mill, dispersion, impact-shear loads, microcrack formation, energy efficiency.

ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies on the fine grinding of materials under different modes of vibrational impact. Three operation modes were analyzed: horizontal bidirectional impact, vertical unidirectional impact, and their combined application. A specially designed grinding unit developed by the authors enables simultaneous horizontal and vertical oscillatory loads to be applied to the grinding media. The results demonstrate that grinding efficiency strongly depends on the direction of the applied vibrational forces. The highest degree of size reduction was observed under the combined mode, where the average particle size decreased to 62 μm . The simultaneous action of impact and shear loads promotes multipath particle breakage, reduces stagnant zones, and increases the energy efficiency of the process. The findings confirm the effectiveness of combined vibrational impacts for intensifying fine grinding and can be used in the design of energy-efficient grinding equipment.

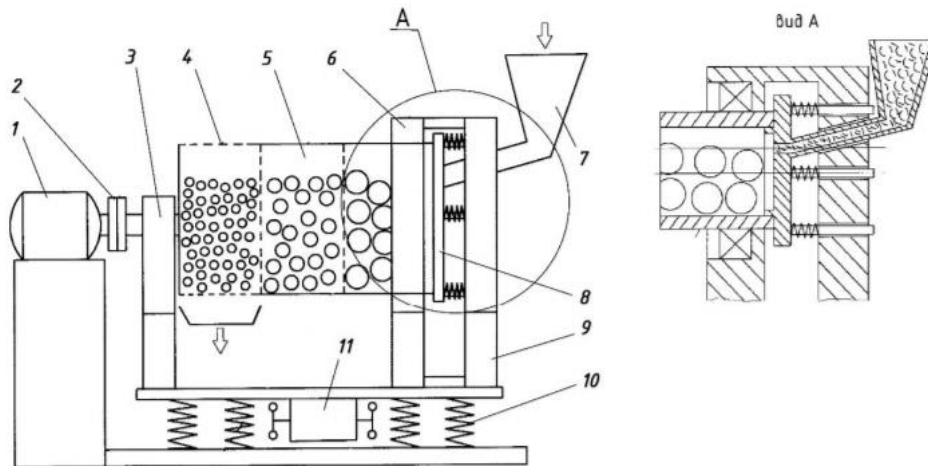
КІРІСПЕ

Материалдарды майдалап ұнтақтау процесі – ұнтақтар, шикізат компоненттері және құрылыс материалдарын өндіру технологияларындағы негізгі кезеңдердің бірі болып табылады. Бұл процесс алынатын өнімнің кейінгі физика-механикалық және химиялық қасиеттерін айқындайды. Ұнтақтауға жұмсалатын энергия шығындары дәстүрлі түрде өнімнің өзіндік құнының едәуір бөлігін құрайтындықтан, оның энергия тиімділігін арттыру жолдарын жетілдіру мәселесі қазіргі уақытта өзекті ғылыми міндет болып отыр (Nyarko et al., 2025; Purhamadani et al., 2024; Islam et al., 2024; Zhang et al., 2022; Guo et al., 2023).

Қазіргі ғылыми зерттеулер дезинтеграция процестерін қарқындатуға бағытталған, бұл үшін жұмыс кеңістігінің параметрлерін, әсер ету режимдерін және ұнтақтау жабдықтарының конструктивтік ерекшеліктерін оңтайландыру әдістері қарастырылуда. Әсіресе, майдалау дәрежесін арттырумен қатар, соққы энергиясының материал көлемі бойынша біркелкі бөлінуін қамтамасыз ететін тәсілдерді іздеу өзекті саналады (Alauddin et al., 2018; Bouchard et al., 2017).

Ұнтақтағыш денелері бар диірмендердің конструкцияларын жетілдіру бағыттарын және практикалық тәсілдерін анықтау мақсатында дірілдік және біріктірілген типтегі ұнтақтағыштарға арналған патенттік дереккөздерге талдау жүргізілді. Талдау нәтижелері бойынша жұмыс жүктемесінің қозғалыс траекториясын және бөлшектердің өзара әрекеттесу сипатын өзгерту арқылы ұнтақтау тиімділігін арттыруға бағытталған бірқатар түпнұсқа инженерлік шешімдер анықталды.

Ұнтақтағыш денелері бар диірмендердің конструкцияларын жетілдірудің маңызды бағыттарының бірі – жұмыс аймағындағы араластыру қарқындылығын және материалдың біркелкі таралуын арттыру. Осы талаптарға сәйкес келетін құрылғы – Тамбов мемлекеттік техникалық университетінде әзірленген дірілді-айналмалы шарлы диірмен (1-сурет) (Чайников, 2000).



1-сурет. Тамбов мемлекеттік техникалық университетінің дірілді-айналмалы диірмен
Ескерту – Чайников, 2000 еңбегінен алынған

Қондырғының конструкциясы цилиндрлік барабаннан тұрады, ол подшипниктік тіректерге орнатылып, жетекті моторға серпімді муфта арқылы қосылған. Жұмыс барысында барабанға айналмалы қозғалыс пен дірілдік қозғалыс беріледі, бұл қозғалыстар серіппелер жүйесі арқылы жылжымалы плитаға орнатылған дебалансты дірілдеткіш арқылы жасалады. Мұндай тербеліс пен айналудың үйлесімі ұнтақтағыш денелердің күрделі кеңістіктік динамикасын қалыптастырады, нәтижесінде бөлшектердің бұзылу процесі қарқындылық алады.

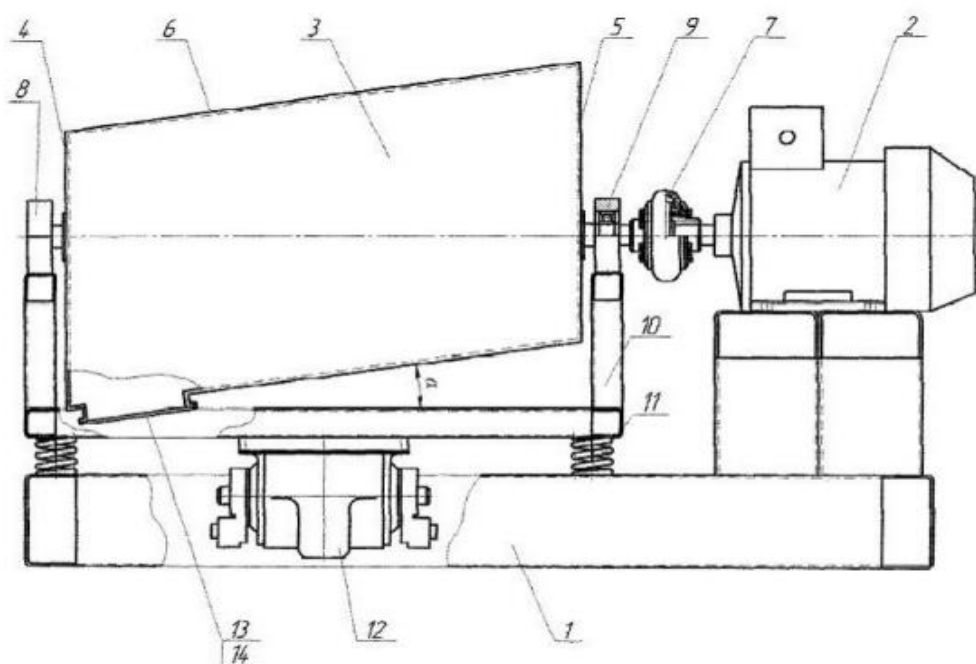
Барабанның ішкі кеңістігі перфорацияланған аралық қалқалармен бөлінген, олар бірнеше камера жасайды, әр камера түрлі диаметрлі ұнтақтағыш денелермен толтырылады. Жұмыс көлемін осылай ұйымдастыру бөлшектердің өлшемін біртіндеп кішірейтуге және жүктемені барабан ұзындығы бойынша біркелкі бөлуге мүмкіндік береді. Материалды жүктеу жоғарғы шетжақ келте құбыр арқылы жүзеге асырылады, ал түсіру – корпусының перфорацияланған бөлімі арқылы жүргізіледі, бұл процестің үздіксіз болуын қамтамасыз етеді.

Ұсынылған конструкция тұйық аймақтардың пайда болу ықтималдығын айтарлықтай төмендетуге және ұнтақтау камерасының пайдалы көлемін тиімді пайдалануға мүмкіндік берді. Дегенмен, жүктеу торабының күрделі конфигурациясы жеткілікті герметикалығын қамтамасыз етпейді, сондықтан бұл диірмен тек құрғақ материалдар үшін қолайлы. Ылғалды майдалау кезінде, сондай-ақ газдық немесе жарылыс қаупі бар орталарда қондырғыны қолдану қиындық туғызады.

Қондырғының ерекшелігі – жұмыс органына айналмалы және дірілдік қозғалыстардың бір уақытта берілуі, бұл бөлшектердің бұзылуын іске асыратын соққы-үйкеліс әсерінің біріктірілген режимін қалыптастырады. Алайда осыған қарамастан, ұнтақтағыш денелердің қозғалысы біржақты болып қалады – процестің энергия тиімділігін арттыра алатын қарсы бағыттағы өзара әрекет конструкцияда жүзеге асырылмаған.

Дірілдік ұнтақтағыштардың конструкцияларын дамыту барысында зерттеушілердің ерекше назарын бірнеше қозғалыс түрлерін біріктіру арқылы ұнтақтағыш денелердің материалға әсер ету қарқындылығын арттыру мәселесі аудартты. Осындай инженерлік шешімдердің бірі – көлбеу типтегі дірілді-айналмалы диірмен (Гаврунов, 2011), оның конструктивтік сұлбасы 2-суретте көрсетілген.

Қондырғының негізгі элементі – цилиндрлік пішінді ұнтақтау камерасы, ол горизонталь жазықтыққа қатысты белгілі бір бұрышпен орнатылған. Камера подшипниктік тіректерге бекітілген және олар серпімді элементтер арқылы жылжымалы рамаға қосылған, бұл дірілді жетек арқылы келетін тербелістерді камераға беруге мүмкіндік береді. Камераның айналуы бөлек жетек арқылы серпімді муфта көмегімен жүзеге асырылады. Осылайша, агрегат жұмыс істеген кезде ұнтақтау ортасына айналмалы және дірілдік қозғалыстар бір уақытта беріледі.



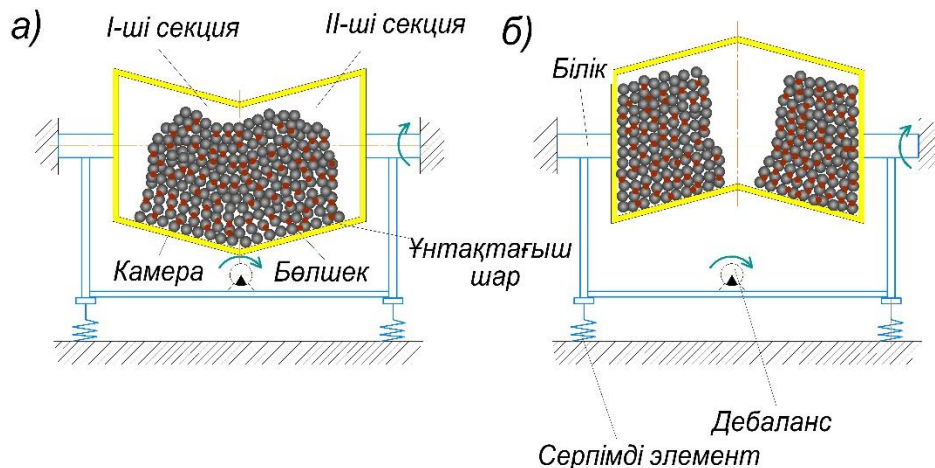
2-сурет. Көлбеу камерасы бар дірілді-айналмалы типтегі шарлы диірмен
Ескерту – Гаврунов (2011) еңбегінен алынған

Екі түрлі қозғалыстың комбинациясы ұнтақтағыш денелердің күрделі қозғалыс траекториясын қалыптастырады, мұнда айналмалы циркуляция, кері-қайтымды тербелістер және араластыру элементтері қатар жүреді. Мұндай қозғалыс бөлшектер мен ұнтақтағыш денелер арасындағы соққы және үйкеліс байланыстарының санын арттырып, материалдың майдалану дәрежесіне оң әсер етеді. Зерттеу авторларының айтуынша, қозғалысты бұлай ұйымдастыру алынатын ұнтақтың меншікті бетін ұлғайтуға мүмкіндік береді.

Алайда, камераның айналу жиілігі жоғары болған жағдайда материалдың бойлық бағыттағы жылжу жылдамдығының төмендеуі байқалады, соның салдарынан динамикалық жүктемелердің ұнтақтау осі бойымен тиімді бөлінуі төмендейді. Нәтижесінде кинетикалық энергияның бір бөлігі бөлшектерді бұзу процесіне емес, олардың қабаттың перифериясы бойымен циркуляциясына жұмсалады. Бұдан бөлек, конструкцияда ұнтақтағыш денелердің қарсы бағытта қозғалу режимі қарастырылмаған,

ал кейінгі зерттеулер мұндай режимнің материалды ұнтақтаудың энергия тиімділігін айтарлықтай арттыра алатынын көрсеткен.

3-суретте бөлшектерге біріктірілген әсер ету жағдайында, атап айтқанда вертикаль бағыттағы дірілдік тербелістер кезінде ұнтақтағыш шарлардың қарсы соқтығысуын зерттеуге арналған диірмен конструкциясы келтірілген (Baigereyev, 2023).



3-сурет. Камерасы V-тәрізді пішінді диірмен:

- а) ұнтақтағыш шарлардың қарсы соқтығысу сәтіндегі камераның орналасуы;
 - б) ұнтақтағыш шарлардың қарсы соқтығысуына дейінгі камераның орналасуы
- Ескерту – Baigereyev (2023) еңбегінен алынған

Қондырғының конструкциясы екі негізгі бөліктен тұратын дәнекерленген металл рамадан жасалған: қозғалмайтын тірек негізі және жұмыс камерасы орналастырылған қозғалмалы модуль.

Қозғалмалы рама 1 V-тәрізді ұнтақтау камерасы 2 үшін тіреуіш негіз қызметін атқарады. Камера өздігінен центрленетін подшипниктері бар подшипниктік тіректерге 3 тіреліп, еркін айналуын қамтамасыз етеді. Камераның жұмыс көлемі болат ұнтақтағыш денелермен толтырылған. Камераның екі секциясының әрқайсысы диаметрі 100 мм болатын цилиндрлік пішінге ие, қабырға қалыңдығы 4 мм; 6 мм қалыңдықтағы шетжақ қабырғалар айналу өсіне перпендикуляр орналасқан. Секциялардың цилиндрлік бөліктері горизонталь жазықтыққа қатысты 35° бұрышпен жалғанған, бұл камераның V-тәрізді конфигурациясын қалыптастырады.

Материалды жүктеу люк 4 арқылы жүзеге асады, люк герметикалық қақпақпен жабылады. Камераның айналуын 5-шығырлы редуктор және 6-электрқозғалтқыш қамтамасыз етеді, айналу моменті сыналы белдікті беріліс 7 арқылы беріледі.

Қозғалмалы рама қозғалмайтын рама 8 үстіне 9 серпімді элементтер – болат серіппелер арқылы орнатылған. Бұл серіппелер дірілдік жүктемелерді қабылдап, қондырғының жұмыс бөлігінің тербеліс қозғалыстарын қамтамасыз етеді. Дірілдік әсерді қалыптастыру үшін қозғалмалы рамада екі дебаланс 10 орнатылған, олар электрқозғалтқышқа 12 серпімді муфта 11 арқылы қосылған. Айналмалы және дірілдік қозғалыстардың өзара әрекеттесуі ұнтақтаудың біріктірілген режимін іске асырады.

Ұсақ майдалауды жетілдіру мақсатында авторлар процесс горизонталь бағытта материалға екіжақты, ал тік бағытта – біржақты әсер ететін конструкцияны ұсынған.

Бұл құрылым келесі элементтерден тұрады: қозғалмайтын рама, ұнтақтау ортасымен толтырылған ұнтақтау камерасы, камера ішінде орналасқан поршеньдер,

дірілдік үстел, дебалансты дірілдеткіштер, сондай-ақ көлденең серіппелер және тік серіппелер.

Осы жұмыстың мақсаты – материалдарды ұсақ майдалауға арналған ұсынылған диірмен конструкциясының тиімділігін эксперименталды түрде тексеру.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Эксперименттік зерттеулерді жүргізу үшін арнайы эксперименттік қондырғы әзірленді (4-сурет).



4-сурет. Эксперименттік қондырғы

Ескерту – автор (немесе авторлар) құрастырған

Ұнтақтау камерасы диаметрі 100 мм және ұзындығы 300 мм болатын цилиндрлік контейнер түрінде жасалған (Baigereyev et al., 2025). Ұнтақтау ортасы ретінде диаметрі 10 мм болат шарлар қолданылды (Zheng et al., 2025; Moys, 2025; Jayasundara et al., 2012). Поршеньдер шток арқылы дебалансты дірілдеткіштермен 6 жалғанған. Поршеньдердің бастапқы орнына қайта келуі дебалансты дірілдеткіштер мен поршеньдер арасында орналасқан көлденең серіппелер арқылы қамтамасыз етіледі. Дірілдік үстел тік серіппелерге орнатылған. Үстелдің тербелістері электрқозғалтқышпен айналатын дебаланс арқылы жасалады.

Ұнтақталатын материал ретінде алдын ала кептіріліп, 100 мкм-нен кіші фракцияға дейін електен өткізілген құм қолданылды. Ұнтақтау ортасы ретінде диаметрі 10 мм болат шарлар пайдаланылды.

Эксперимент материалға әсер етудің үш түрлі режимін қамтыды:

1. Режим I – екіжақты әсер (көлденең бағыт):

Поршеньдермен жалғанған дебалансты дірілдеткіштер іске қосылды. Материал көлденең бағыттағы кері-қайтымды импульстарға ұшырап, ұнтақтау ортасында периодты қысылу мен босау процестері жүрді.

2. Режим II – біржақты әсер (тік бағыт):

Тек дірілдік үстелдің дебалансты валы іске қосылды. Бұл режимде ұнтақтау камерасы тік тербелістерге ұшырап, бөлшектер негізінен төменнен жоғары бағытталған соққы әсерін қабылдады.

3. Режим III – біріктірілген әсер (көлденең + тік):

Көлденең дірілдеткіштер мен дебаланс білігі бір уақытта қосылды. Бұл кезде материалға екіжақты көлденең және біржақты тік әсердің үйлесуі нәтижесінде күрделі кернеулі күй орын алды.

Эксперименттік зерттеулердің режимдік параметрлерін (тербеліс жиілігі – 50 Гц, амплитуда – 2 мм, процесс ұзақтығы 20 минут, камераның толтырылу дәрежесі 80 %) таңдау алдын ала жүргізілген ізденіс сынақтары мен дірілдік диірмендердің динамикалық тепе-теңдігіне сүйене отырып негізделді. 50 Гц жиілік пен 2 мм амплитуда мәндері ұнтақтағыш шарларға үдеудің критикалық деңгейін беру үшін таңдалды, бұл материалды қабаттық циркуляциядан жоғары қарқынды соққы-ығысу режиміне өткізуге жеткілікті кинетикалық энергия береді. Ұзақтықтың 20 минут болып белгіленуі бөлшектердің қарқынды ұсақталу кезеңі мен одан кейінгі агломерациялану және ұнтақталу шегіне жету процестері арасындағы кинетикалық тепе-теңдікке сәйкес келеді.

Эксперименттік деректердің сенімділігі мен қайталанушылығын қамтамасыз ету мақсатында әрбір режим бойынша сынақтар 3 мәртеден (үш қайталау) жүргізілді. Алынған эксперименттік деректерге математикалық-статистикалық талдау жүргізіліп, орташа арифметикалық мән, таңдамалы стандартты ауытқу және Стьюдент критерийі бойынша 95\% сенімділік ықтималдығына ($p < 0.05$) сәйкес сенімділік аралықтары есептелді. Нәтижелердің вариация коэффициенті 4.5 %-дан аспады, бұл өлшеу әдісінің жоғары дәлдігі мен эксперименттің қайталанушылығын көрсетеді.

Жиілік жиілік түрлендіргіші арқылы берілді, ал амплитуда дірілдік үстел корпусына орнатылған амплитуда өлшегішімен бақыланды (Sun et al., 2025).

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

1-кестеде дірілдік әсердің үш режимі бойынша жүргізілген сынақтардың орташа нәтижелері келтірілген.

1-кесте. Дірілдік әсердің үш режимі бойынша жүргізілген сынақтардың орташа нәтижелері

Әсер ету режимі	Әсер ету сипаттамасы	Майдалану ұсақтығы, мкм
I	Екіжақты (көлденең)	78
II	Біржақты (тік)	96
III	Біріктірілген (көлденең + тік)	62
Ескерту – автор (немесе авторлар) құрастырған		

Кесте деректерінен байқалғандай, майдалау тиімділігі қолданылған дірілдік жүктемелердің сипатына айтарлықтай тәуелді.

Ең жақсы нәтижелер біріктірілген режимде (III) алынды, мұнда көлденең екіжақты және тік біржақты әсер біріктірілген. Бөлшектердің орташа диаметрі 62 мкм-ге дейін азайды, бұл тік әсерге қарағанда 36 %, ал көлденең әсерге қарағанда 21 % төмен.

Мұндай айырмашылық материал көлемінде пайда болатын кернеулі күйдің әртүрлілігімен түсіндіріледі.

Екіжақты көлденең әсер кезінде (I режимі) майдалау процесіне негізгі үлесті шарлар мен материал бөлшектері арасындағы ығысу әрекеттесуі енгізеді. Бөлшектер көп мәрте қажалуға ұшырайды, бұл олардың ең аз кедергі көрсететін беттері бойымен микрожарықтардың түзілуіне ықпал етеді. Алайда қозғалыс бағытының шектеулі болуына байланысты энергияның бір бөлігі тек беткі қажалуға жұмсалып, жалпы тиімділікті төмендетеді.

Біржақты тік әсер кезінде (II режимі) үстел дірілі және шардың камера түбінен серпілуі нәтижесінде пайда болатын соққы-компрессиялық жүктемелер басым болады. Мұндай жүктемелер морт материалдар үшін тиімді болғанымен, ірі бөлшектердің негізінен көлемдік бұзылуына әкеледі және жүктеменің толық көлемі бойынша біркелкі майдалануды қамтамасыз етпейді. Сонымен қатар энергияның бір бөлігі шарларды жоғары лақтырып және материал қабатын орын ауыстыруға жұмсалады, ал бұл материалдың бұзылуына емес, қосымша энергия шығынына әкеледі.

Біріктірілген әсер кезінде (III режимі) күрделі кернеулі күй жүзеге асырылады: көлденең күштер ығысу және үйкеліс тудырады, ал тік күштер – соққылық қысуды жасайды. Нәтижесінде материал бір мезгілде нормаль және жанама кернеулердің әсеріне ұшырайды, бұл бөлшектердің көпбеттік бұзылуына және микрожарықтардың дамыған желісінің қалыптасуына ықпал етеді. Мұндай үйлесім әлсіз аймақтар бойынша бөлшектердің қарқынды бұзылуына, майда фракциялар үлесінің артуына және агломерация ықтималдығының төмендеуіне алып келеді.

Біріктірілген әсердің тиімділігінің артуы ұнтақтау ортасы мен материал арасындағы резонанстық әрекеттесумен түсіндіріледі. Екі бағыттағы тербелістердің қосылуы шарлардың қозғалысқа толық қатысуын қамтамасыз етіп, олардың бөлшектермен және камера қабырғаларымен байланыс жиілігін арттырады. Сонымен қатар екі ось бойынша бір мезгілде әсер ету біріплоскосталы дірілдерге тән «өлі аймақтардың» пайда болу мүмкіндігін азайтады.

Бөлшектердің орташа өлшемінің төмендеуі микробұзылулардың жинақталу әсерімен де байланысты. Әрбір тербеліс циклінде бөлшектер әртүрлі бағыттағы механикалық импульстарға ұшырайды, бұл олардың шаршаулық бұзылуын тездетеді. Осылайша, біріктірілген режим тек соққылық емес, сонымен қатар шаршаулық бұзылу механизмінің басым болуына ықпал етеді, бұл ұсақ майдалау кезінде шешуші рөл атқарады.

Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, біріктірілген әсер ең жоғары майдалау дәрежесін және фракциялық құрамның жақсы сапасын қамтамасыз етеді; майдалау тиімділігі тек діріл амплитудасы мен жиілігіне (бұл жағдайда 2 мм және 50 Гц) ғана емес, сондай-ақ күштердің қолданылу бағытына да тәуелді; ұсынылған диірмен конструкциясы діріл энергиясын орынды пайдалануға және жетек қуатын арттырмай-ақ процесс энергия тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген эксперименттік зерттеулер дірілдік әсер сипатының ұсақ майдалау процесінің тиімділігіне айтарлықтай ықпал ететінін растады. Екіжақты көлденең, біржақты тік және біріктірілген үш жұмыс режимін салыстырмалы талдау материалдың майдалану дәрежесінде принципті айырмашылықтардың бар екенін көрсетті. Ең жақсы нәтижелер біріктірілген әсер кезінде алынған, мұнда бөлшектердің орташа өлшемі 62 мкм-ге дейін азайып, тік тербелістермен салыстырғанда 36 %, ал көлденең тербелістермен салыстырғанда 21 % төмен болды.

Ығысулық және соққы-компрессиялық жүктемелердің үйлесуі материал көлемінде көпбеттік кернеулі күйдің қалыптасуын қамтамасыз ететіні, микрожарықтардың түзілуін қарқындататыны және бөлшектердің неғұрлым толық бұзылуына ықпал ететіні анықталды. Мұндай режим ұнтақтағыш денелердің қозғалысқа тартылуын арттырып, олардың материалмен байланыс жиілігін көбейтеді, тұйық аймақтардың пайда болу ықтималдығын төмендетеді және осылайша процестің энергия тиімділігін арттырады. Бақыланған әсер механикалық импульстар санының артуымен де, сондай-ақ бөлшектердің күшейген шаршаулық бұзылуымен де байланысты, ал бұл ұсақ майдалау кезінде негізгі механизм болып табылады.

Жұмыс нәтижелері көлденең және тік бағыттарда біріктірілген әсерді жүзеге асыратын ұсынылған диірмен конструкциясының болашағы жоғары екенін растайды. Бұл конструкция діріл энергиясын неғұрлым орынды бөлуді қамтамасыз етеді және энергия тұтынуын арттырмай-ақ майдалау тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді. Алынған деректер дірілдік және біріктірілген диірмендердің конструкцияларын одан әрі оңтайландыруда, сондай-ақ әртүрлі материалдар үшін ұсақ майдалаудың энергия тиімді технологияларын әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылай қолдауы арқылы орындалды (Грант №АР22685023).

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ: Қолданылмайды.

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректерді тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алуға болады.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Осы зерттеу бойынша алғыс білдіретін тұлғалар немесе ұйымдар жоқ.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Осы мақаланы әзірлеу барысында жасанды интеллект пен автоматтандырылған мәтін генерациясы жүйелері қолданылған жоқ. Барлық материалдар, нәтижелер мен тұжырымдар авторлар тарапынан өз бетінше дайындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Nyarko, D., Amos-Judge, T., Drechsler, M., Abaka-Wood, G., & Skinner, W. (2025). Effect of comminution mechanism on flotation of coarse particles. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.102GWD324PN>
- Purhamadani, E., & Bagherpour, R. (2024). The role of different explosives in reducing energy and emissions in mining comminution for sustainable improvement. *Energy*, 310(C). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133233>
- Islam, M. A., Masschelein, J., Michel-Lisbonne, S., Ragaei, S., & Zhu, J. (2024). Particle size reduction influences starch and protein characteristics of wheat bran and defatted wheat germ. *Journal of Cereal Science*, 112, 105414. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.105414>
- Li, H., Zhang, H., Huang, K., Liang, D., Zhao, D., & Jiang, Z. (2022). Effect of ball milling speed on the quality of Al₂O₃ stripped graphene in a wet milling medium. *Ceramics International*, 48, 17171–17177. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.123>
- Guo, W., Gui, X., Xing, Y., Zhang, H., Ma, R., Meng, W., & Luo, M. (2023). Study on the unequal-probability comminution of spodumene and feldspar during the grinding process of lithium ore. *Powder Technology*, 418, 118776. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118776>
- Alauddin, A. N., Hassan, H. A. G. R., & Sulaiman, S. H. (2018). Model based on an effective material-removal rate to evaluate specific energy consumption in grinding. *Materials*, 12(6), 939. <https://doi.org/10.3390/ma12060939>
- Bouchard, J., LeBlanc, G., Levesque, M., Radziszewski, P., & Georges-Filteau, D. (2017). Breaking down energy consumption in industrial grinding mills. In *Proceedings of the 49th Annual Canadian Minerals Processors Conference* (pp. 25–35). Ottawa, Canada. Retrieved from <https://www.ceecthefuture.org/resources/breaking-energy-consumption-industry-grinding-mills>

- Гаврунов, А.Ю., & Богданов, В.С. (2011). Вибровращательная мельница (Патент РФ № 105199). Федеральная служба по интеллектуальной собственности. // Gavrunov, A.Yu., & Bogdanov, V.S. (2011). Vibrovrashchatel'naya mel'nitsa [Vibratory rotary mill] (Russian Federation Patent No. 105199). Federal Service for Intellectual Property. (In Russ.)
- Чайников, Н.А., Мозжухин, А.Б., & Жариков, В.В. (2000). Вибровращательная шаровая мельница (Патент РФ № 2147931). Федеральная служба по интеллектуальной собственности // Chaynikov, N.A., Mozzhukhin, A.B., & Zharikov, V.V. (2000). Vibrovrashchatel'naya sharovaya mel'nitsa [Vibratory rotary ball mill] (Russian Federation Patent No. 2147931). Federal Service for Intellectual Property. (In Russ.)
- Baigereyev, S., Guryanov, G., Suleimenov, A., Abdeyev, B., & Kim, V. (2023). New Method for Materials Comminution Using Grinding Balls. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, 17(2), February 2023. <https://doi.org/10.15866/ireme.v17i2.22536>
- Baigereyev, S., Guryanov, G., Suleimenov, A., & Abdeyev, B. (2025). New approach to effective dry grinding of materials by controlling grinding media actions. *Applied Sciences*, 15(14), 7713. <https://doi.org/10.3390/app15147713>
- Zheng, G., Yang, Z., Sun, K., Lv, H., & Ma, L. (2025). Effect of grinding media, time, and particle size on coal particle shape: Interpretation of aspect ratio-modified roundness for products of ball and rod mills. *Minerals Engineering*, 222, 109158.
- Moys, M. H. (2015). Grinding to nano-sizes: Effect of media size and slurry viscosity. *Minerals Engineering*, 74, 64–67.
- Jayasundara, C. T., Yang, R. Y., & Yu, A. B. (2012). Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills. *Minerals Engineering*, 33, 66–71.
- Sun W., Yan X., Wang S., Zhang L., Yun W., & Chen Y. (2025). Random vibration study of cold rolling mill excited by different hardness of strip steel. *Applications in Engineering Science*, 22, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.applescieng.2025.100213>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Байгереев Самат Ракимгалиевич – философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Байгереев Самат Ракимгалиевич – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Baigereyev Samat Rakimgaliyevich – PhD, Associate Professor, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7773-5457>,



Гурьянов Георгий Александрович – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Гурьянов Георгий Александрович – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Guryanov Georgiy Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: gguryanov@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>,



Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, Торайғыров Университет, г. Павлодар, Казахстан

Suleimenov Ansagan Dyusembaevich – PhD, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan,
e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9319-0285>,



Ғабдысәлік Риза – философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Ғабдысәлік Риза – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Gabdyssalyk Riza – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9184-0897>